



**Universidade de Aveiro** Departamento de Engenharia Civil  
2015

**Carlota Vilarinho** **SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO E**  
**Carvalho Garcia Mendes** **ENERGÉTICO DE EDIFÍCIOS DE ADOBE**





**Universidade de Aveiro** Departamento de Engenharia Civil  
2015

**Carlota Vilarinho**  
**Carvalho Garcia Mendes**

**SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO E  
ENERGÉTICO DE EDIFÍCIOS DE ADOBE**

Dissertação de mestrado apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil realizada sob a orientação científica do Professor Doutor Romeu da Silva Vicente, Professor Associado e do Professor Doutor Aníbal Guimarães da Costa, Professor Catedrático, do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.



**o júri**

presidente

Prof. Doutor Paulo Jorge de Melo Matias Faria de Vila Real  
professor catedrático da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Ricardo Manuel dos Santos Ferreira de Almeida  
professor adjunto do Instituto Politécnico de Viseu

Prof. Doutor Romeu da Silva Vicente  
professor associado da Universidade de Aveiro



## **agradecimentos**

Gostaria de deixar algumas palavras de agradecimento a todos os que, de forma directa ou indirecta, contribuíram para a concretização deste trabalho.

Em primeiro lugar, agradeço ao Prof. Romeu da Silva Vicente, orientador da dissertação, por toda a dedicação, disponibilidade, paciência e incentivo.

Ao co-orientador, Prof. Aníbal Guimarães de Costa, pela paciência demonstrada e prontidão no esclarecimento de dúvidas.

À Sra. Maria, proprietária da casa em estudo, pelo seu tempo e simpatia.

Um agradecimento muito especial ao aluno de Doutoramento António Figueiredo e ao amigo e Engenheiro José Figueira por toda a ajuda prestada e disponibilidade demonstrada, forte contribuição para o desenvolvimento deste trabalho.

À Arquitecta Alice Tavares, por toda a partilha de conhecimento e simpatia.

À minha família, nomeadamente pais, irmãos, avó Laura e madrinha Rita, a quem dedico este trabalho, por todo o amor e ânimo nas horas mais difíceis.

Aos amigos, pelos bons momentos vividos e pelo apoio, em especial à Beatriz Martins, Maria João Matos, Alexandre Peralta, Pedro Narra, Ana Simões, Ana Silva, Diogo Silva, André Guimarães, Diogo Limas e Guilherme Ascensão. À família Matos agradeço todo o carinho, amizade e incentivo, bem como as belas jantaradas. Por fim, um enorme agradecimento à amiga Alice Barros, pela sua contribuição muito própria, à qual dou bastante valor.

Por último, mas não menos especial, agradeço a Deus por se encontrar presente na minha vida e por todos os ensinamentos e valores que me transmitiu, contribuindo para a conclusão desta difícil etapa, indispensável ao meu crescimento pessoal e formação profissional.





## palavras-chave

Construção em adobe, Simulação dinâmica de edifícios, Conforto térmico, Estratégias de reabilitação térmica e energética.

## resumo

Em Portugal existe um vasto património construído em alvenaria de adobe, com especial incidência na região de Aveiro. De modo a evitar que a demolição seja uma das primeiras estratégias a ser ponderada para o edificado envelhecido de adobe, e de modo a salvaguardar a satisfação das condições de conforto térmico, sem necessidades excessivas de energia, é necessário investir na sua reabilitação térmica e energética.

O principal objectivo deste trabalho é a avaliação do conforto térmico e das necessidades energéticas de um edifício em adobe, assim como a definição e análise de estratégias de reabilitação térmica e energética. Para além deste, o trabalho pretende estudar a influência da alteração do sistema construtivo das paredes da envolvente exterior, implementadas ao longo da primeira metade do século XX, em detrimento do sistema tradicional de adobe, no conforto térmico e consumo energético.

De modo a cumprir os objectivos e a garantir uma avaliação mais precisa das estratégias e soluções construtivas, recorreu-se ao programa de simulação dinâmica, *EnergyPlus*, tendo como modelo base um edifício de adobe situado na região de Aveiro. A análise do desempenho térmico baseia-se no regulamento nacional REH (DL n.º118/2013) e na Norma Europeia EN 15251 (CEN, 2007).

Segundo o estudo das diferentes soluções construtivas das paredes pertencente à envolvente opaca externa não foram visíveis melhorias significativas do ponto de vista do comportamento térmico. De facto, todas as soluções estudadas apresentam resultados semelhantes no que respeita à percentagem de desconforto.

Para o estudo de sensibilidade, foram simulados 54 modelos para avaliar a influência de diferentes parâmetros (espessura do isolamento térmico e sua posição, taxa de renovação do ar e soluções envidraçadas). Após a realização das diversas simulações e respectiva análise dos resultados, concluiu-se que as estratégias implementadas melhoram o conforto térmico do edifício estudado, minimizando o seu consumo energético para ambas as estações, de aquecimento e de arrefecimento.



**keywords**

Adobe construction, Dynamic building simulation, Thermal comfort, Energetic and thermal refurbishment strategies

**abstract**

In Portugal there is a vast built heritage in adobe construction, with a strong presence in the Aveiro region. In order to rule out demolition as one of the first strategies under consideration for the aged adobe buildings and in order to safeguard and comply with thermal comfort requirements, without excessive energy demand, it is necessary to invest in their thermal and energy refurbishment.

The main objective of this dissertation is to assess the thermal comfort and energy demand of adobe building stock, as well as the definition and analysis of thermal and energy rehabilitation strategies. Moreover, the work aims to study the influence in thermal comfort and energy demand of the solutions with respect to external envelope walls evolution, which were implemented in the first half of the twentieth century, disregarding the traditional adobe system.

To meet objectives and to ensure a more accurate assessment of the strategies and constructive solutions, a dynamic simulation program, EnergyPlus, was used. The software was used to simulate an existing adobe building located in the region of Aveiro. The thermal performance analysis is based on national thermal code REH (DL n.º118/2013) and the European standard EN 15251 (CEN, 2007).

Regarding the analysis of different constructive solutions with respect to external envelope walls, no relevant improvements were attained from the thermal behaviour point of view. In fact, all the studied solutions presented similar results regarding discomfort rate.

For the sensibility analysis, 54 models were run and analysed to access the influence of different parameters (insulation thickness and positioning, air change rate and window solutions). After several simulation and respective results analysis, it was concluded that the implemented strategies were able to improve the thermal comfort of the studied, minimizing its energy demand for both cooling and heating season.







**ÍNDICE**

Índice de Figuras .....	V
Índice de Tabelas .....	VIII
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1. Enquadramento .....	1
1.2. Objectivos .....	2
1.3. Organização e Estrutura da Dissertação .....	3
<b>2. ESTADO DA ARTE.....</b>	<b>7</b>
2.1. Construção em alvenaria de adobe .....	7
2.1.1. A construção na região de Aveiro .....	7
2.1.2. Técnicas de construção .....	8
2.1.3. Sistema construtivo e sua evolução .....	9
2.1.4. Potencial da construção em alvenaria de terra.....	12
2.2. Comportamento térmico e energético de edifícios .....	13
2.2.1. Legislação Nacional.....	14
2.2.2. Conforto térmico interior.....	16
2.2.3. Inércia Térmica e Ventilação.....	21
2.3. Simulação dinâmica.....	22
2.3.1. Simulação dinâmica do comportamento térmico e energético de edifício .....	22
2.3.2. O programa <i>EnergyPlus</i> .....	23
2.4. Estratégias de reabilitação .....	25
2.4.1. Reabilitação térmica e energética .....	25
2.4.2. Medidas passivas e activas .....	26
2.4.3. Reabilitação térmica e energética dos elementos da envolvente .....	26
2.4.4. Reabilitação térmica e energética de edifícios em adobe .....	29
<b>3. CARACTERIZAÇÃO DO CASO DE ESTUDO.....</b>	<b>33</b>
3.1. Considerações gerais .....	33
3.2. Localização do edifício.....	33
3.2.1. Localização geográfica .....	33
3.2.2. Clima.....	34

3.3. Descrição do edifício .....	36
3.3.1. Configuração do edifício .....	36
3.3.2. Soluções construtivas.....	37
3.4. Monitorização .....	42
<b>4. MODELO NUMÉRICO.....</b>	<b>49</b>
4.1. Considerações gerais .....	49
4.2. Construção do modelo geométrico .....	49
4.2.1. Zonas térmicas .....	51
4.2.2. Vãos – portas e janelas .....	52
4.2.3. Sombreamento .....	53
4.2.4. Áreas e volumes do edifício .....	53
4.3. Dados climáticos.....	55
4.3.1. Distribuição solar.....	58
4.4. Características dos materiais.....	58
4.4.1. Elementos opacos .....	59
4.4.2. Envidraçados e dispositivo de sombreamento.....	62
4.5. Ganhos internos .....	63
4.6. Sistemas de climatização .....	64
4.7. Sistemas de ventilação .....	65
4.8. Mobiliário .....	66
4.9. Padrões de utilização do edifício .....	66
4.10. Validação do modelo.....	66
4.10.1. Validação para a estação de aquecimento .....	67
4.10.2. Validação para a estação de arrefecimento.....	69
4.11. Síntese.....	70
<b>5. CASO DE ESTUDO – ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO E ENERGÉTICO .....</b>	<b>75</b>
5.1. Considerações gerais .....	75
5.2. Qualidade térmica da envolvente externa.....	76
5.3. Estação de aquecimento.....	78
5.3.1. Análise da temperatura interior .....	78
5.3.2. Análise do conforto térmico segundo a norma EN 15251.....	81



---

5.3.3. Análise das necessidades energéticas .....	82
5.4. Estação de Arrefecimento .....	83
5.4.1. Análise da temperatura interior .....	83
5.4.2. Análise do conforto térmico segundo a norma EN 15251 .....	85
5.4.3. Análise das necessidades energéticas .....	86
5.5. Análise do desempenho térmico e energético das soluções construtivas da envolvente externa opaca.....	87
5.5.1. Caracterização das soluções construtivas .....	87
5.5.2. Estação de Aquecimento.....	90
5.5.2.1. Análise da temperatura e conforto térmico.....	90
5.5.2.2. Análise das necessidades energéticas .....	95
5.5.3. Estação de Arrefecimento .....	96
5.5.3.1. Análise da temperatura e conforto térmico.....	96
5.5.3.2. Análise das necessidades energéticas .....	99
5.6. Síntese.....	99
5.6.1. Solução original do caso de estudo.....	99
5.6.2. Soluções construtivas da envolvente externa opaca .....	100
<b>6. ESTRATÉGIAS DE REABILITAÇÃO TÉRMICA E ENERGÉTICA – ANÁLISE DO SEU DESEMPENHO .....</b>	<b>105</b>
6.1. Considerações Gerais.....	105
6.2. Selecção das estratégias de reabilitação .....	105
6.3. Estudo de sensibilidade das estratégias .....	108
6.3.1. Estação de aquecimento.....	108
6.3.2. Estação de arrefecimento .....	112
6.3.3. Síntese.....	116
6.4. Análise comparativa entre a melhor estratégia de reabilitação e o caso de estudo original – conforto térmico e desempenho energético.....	117
6.4.1. Estação de aquecimento.....	117
6.4.2. Estação de arrefecimento .....	123
6.4.3. Análise comparativa entre todas as estratégias.....	126
6.5. Síntese.....	128
<b>7. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>131</b>

---

7.1. Comportamento do caso de estudo .....	132
7.2. Comportamento das soluções construtivas de paredes exteriores .....	133
7.3. Estratégias de reabilitação térmica e energética .....	134
7.4. Simulação dinâmica.....	137
7.5. Norma Europeia EN 15251 .....	138
7.6. Perspectiva de trabalhos futuros .....	138
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>143</b>
<b>ANEXOS</b>	
<b>ANEXO A – PLANTAS DO CASO DE ESTUDO .....</b>	<b>153</b>
<b>ANEXO B – RESULTADOS DAS ESTRATÉGIAS DE REABILITAÇÃO.....</b>	<b>161</b>

## Índice de Figuras

<b>Figura 1</b> - Distribuição geográfica das técnicas construtivas em terra, em Portugal. Adaptado de (Torgal & Jalali, 2009b). .....	8
<b>Figura 2</b> - a) Moldagem de blocos de adobe (TPS, 2015); b) Cura de blocos de adobe. ....	9
<b>Figura 3</b> - Arquitectura de edifícios de adobe em Ílhavo. a) Edifício rural; b) Edifício urbano; c) Edifício urbano com influências da imigração; d) Edifício <i>Art Nouveau</i> (crédito: Alice Tavares).....	10
<b>Figura 4</b> – Evolução do sistema construtivo de adobe em Ílhavo; a) Sistema tradicional; b) Sistema com introdução de anéis de viga em betão armado; c) Sistema com introdução de lajes em betão armado; d) Sistema híbrido. Adaptado de (Tavares <i>et al.</i> , 2012b). 12	
<b>Figura 5</b> - Limites de conforto para a estação de arrefecimento da norma 15251 (CEN, 2007). .....	19
<b>Figura 6</b> - Módulos internos do programa <i>EnergyPlus</i> e sua organização Adaptado de: ( <i>EnergyPlus</i> , 2013a). .....	24
<b>Figura 7</b> - a) Localização do edifício em relação a Portugal; b) Localização do edifício em relação ao que o rodeia (Fonte: GoogleEarth). .....	34
<b>Figura 8</b> - Configuração do edifício. a) Fachada principal; b) Planta do r/c; c) Planta do 1º andar; d) Planta do sótão. ....	37
<b>Figura 9</b> - Localização dos sensores na casa em estudo. ....	43
<b>Figura 10</b> - Temperatura registada pelos sensores no período da estação de aquecimento (21 de Dezembro a 20 de Março de 2013). ....	44
<b>Figura 11</b> - Humidade relativa registada pelos sensores no período da estação de aquecimento (21 de Dezembro a 20 de Março de 2013). ....	44
<b>Figura 12</b> - Temperatura registada pelos sensores no período da estação de arrefecimento (19 de Julho a 12 de Setembro de 2012). ....	45
<b>Figura 13</b> - Humidade relativa registada pelos sensores no período da estação de arrefecimento (19 de Julho a 12 de Setembro de 2012). ....	45
<b>Figura 14</b> - Geometria exterior do modelo. a) Fachadas orientadas a SE e SW; b) Fachadas orientadas a NW e NE. ....	51
<b>Figura 15</b> - Geometria interior/compartimentação. a) Compartimentação do r/c; b) Compartimentação do 1º andar; c) Compartimentação do sótão. ....	51

<b>Figura 16</b> - Identificação das zonas térmicas. a) Planta do r/c; b) Planta do 1º andar; c) Planta do sótão.....	52
<b>Figura 17</b> - Média diária da temperatura exterior em Aveiro entre 1961 e 1990.....	56
<b>Figura 18</b> - Probabilidade cumulativa da temperatura exterior em Aveiro.....	57
<b>Figura 19</b> - Média horária da radiação solar horizontal mensal em Aveiro.....	57
<b>Figura 20</b> - Solução construtiva do pavimento em estrutura de madeira.....	60
<b>Figura 21</b> - Diagrama de potência da lareira.....	64
<b>Figura 22</b> - Vãos de portas e janelas. a) Janela pertencente à zona ZT10; b) Porta pertencente à zona ZT15; c) Porta principal.....	65
<b>Figura 23</b> - Resultado da validação no período de Inverno, relativo ao ano 2013.....	68
<b>Figura 24</b> - Resultado das temperaturas interiores da zona térmica com alguns condicionamentos.....	69
<b>Figura 25</b> - Resultado da validação no período de Verão.....	70
<b>Figura 26</b> - Gráfico das temperaturas interiores no período de 1 a 15 de Fevereiro.....	78
<b>Figura 27</b> - Gráfico de probabilidade cumulativa durante a estação de aquecimento.....	80
<b>Figura 28</b> - Conforto térmico das zonas ZT6 e ZT11 na estação de aquecimento.....	81
<b>Figura 29</b> - Conforto térmico das zonas ZT15 e ZT16 na estação de aquecimento.....	81
<b>Figura 30</b> - Necessidades energéticas mensais para a estação de aquecimento.....	82
<b>Figura 31</b> - Gráfico das temperaturas interiores no período de 7 a 21 de Agosto.....	83
<b>Figura 32</b> - Gráfico de probabilidade cumulativa durante a estação de arrefecimento.....	85
<b>Figura 33</b> - Conforto térmico das zonas ZT6 e ZT11, para a estação de arrefecimento. ...	86
<b>Figura 34</b> - Conforto térmico das zonas ZT15 e ZT16, para a estação de arrefecimento. .	86
<b>Figura 35</b> - Comparação do conforto térmico entre a solução original (SA) e as restantes, para a zona térmica ZT11, para a estação de aquecimento.....	93
<b>Figura 36</b> - Comparação do conforto térmico entre a solução SA e as restantes, para a zona térmica ZT4, para a estação de aquecimento.....	94
<b>Figura 37</b> - Necessidades de aquecimento das diferentes soluções construtivas da envolvente externa opaca.....	95
<b>Figura 38</b> - Comparação do conforto térmico entre a solução SA e as restantes, na zona térmica ZT11, para a estação de arrefecimento.....	98
<b>Figura 39</b> - Comparação do conforto térmico entre a solução SA e as restantes, para a zona térmica ZT4, para a estação de arrefecimento.....	98
<b>Figura 40</b> - Esquema em árvore com as estratégias de reabilitação.....	107

<b>Figura 41</b> - Comparação da temperatura interior da estratégia S39 e da solução original do caso de estudo, para as zonas ZT11 e ZT16, de 1 a 15 de Fevereiro. ....	118
<b>Figura 42</b> - Probabilidade cumulativa, para a zona ZT11, para a estação de aquecimento. ....	119
<b>Figura 43</b> - Probabilidade cumulativa, para a zona ZT16, para a estação de aquecimento. ....	119
<b>Figura 44</b> - Comparação da análise de conforto entre a estratégia S39 e a solução original do caso de estudo, segundo a EN15251, para a zona ZT11 e para a estação de aquecimento. ....	120
<b>Figura 45</b> - Comparação da análise de conforto entre a estratégia S39 e a solução original do caso de estudo, segundo a EN15251, para a zona ZT16 e para a estação de aquecimento. ....	120
<b>Figura 46</b> - Necessidades energéticas, para a estação de aquecimento. ....	121
<b>Figura 47</b> - Necessidades energéticas e desconforto térmico, para a estação de aquecimento. ....	121
<b>Figura 48</b> - Gráfico das temperaturas interiores da estratégia S39 e do caso de estudo, para as zonas ZT11 e ZT16, de 7 a 21 de Agosto. ....	123
<b>Figura 49</b> - Probabilidade cumulativa, para a zona ZT11, para a estação de arrefecimento. ....	125
<b>Figura 50</b> - Probabilidade cumulativa, para a zona ZT16, para a estação de arrefecimento. ....	125
<b>Figura 51</b> - Comparação da análise de conforto entre a estratégia S39 e a solução original do caso de estudo, segundo a EN15251, para a zona ZT11, para a estação de arrefecimento. ....	126
<b>Figura 52</b> - Comparação da análise de conforto entre a estratégia S39 e a solução original do caso de estudo, segundo a EN15251, para a zona ZT16, para a estação de arrefecimento. ....	126
<b>Figura 53</b> - Análise comparativa das estratégias de reabilitação simuladas. ....	127

## Índice de Tabelas

<b>Tabela 1</b> - Valores máximos impostos para as necessidades de aquecimento, arrefecimento e energia primária para edifícios sujeitos a grandes intervenções, segundo o REH (DL n.º118/2013). .....	15
<b>Tabela 2</b> - Coeficientes de transmissão térmica máximos admissíveis de elementos opacos, segundo o REH (DL n.º118/2013). .....	16
<b>Tabela 3</b> - Valores de temperatura de projecto segundo a norma EN 15251 (CEN, 2007). .....	20
<b>Tabela 4</b> - Critérios para a determinação da zona climática de Inverno.....	34
<b>Tabela 5</b> - Critérios para a determinação da zona climática de Verão. ....	35
<b>Tabela 6</b> - Descrição das soluções construtivas.....	38
<b>Tabela 7</b> - Percentagem de área envidraçada por orientação de fachada. ....	54
<b>Tabela 8</b> - Percentagem de área envidraçada por compartimentação.....	54
<b>Tabela 9</b> - Parâmetros contidos no ficheiro climático do LNEG.....	56
<b>Tabela 10</b> - Propriedades termofísicas dos materiais. ....	59
<b>Tabela 11</b> – Absortâncias do reboco de cal da envolvente exterior. ....	63
<b>Tabela 12</b> - Propriedades das portadas interiores. ....	63
<b>Tabela 13</b> - Valor do coeficiente de transmissão térmica da envolvente exterior opaca....	77
<b>Tabela 14</b> - Factores solares máximos admissíveis de vãos envidraçados, segundo REH (DL n.º118/2013).....	77
<b>Tabela 15</b> - Variáveis estatísticas da temperatura interior durante a estação de aquecimento.....	79
<b>Tabela 16</b> - Tempo de desconforto térmico na estação de aquecimento. ....	81
<b>Tabela 17</b> - Variáveis estatísticas da temperatura interior durante a estação de arrefecimento.....	83
<b>Tabela 18</b> - Tempo de desconforto térmico na estação de arrefecimento .....	86
<b>Tabela 19</b> - Caracterização das soluções construtivas das paredes exteriores.....	88
<b>Tabela 20</b> - Condutibilidade térmica equivalente dos tijolos cerâmicos. ....	89
<b>Tabela 21</b> - Análise da temperatura interior, conforto térmico e necessidades energéticas das diferentes soluções construtivas, para a estação de aquecimento. ....	91

<b>Tabela 22</b> - Análise da temperatura interior, conforto térmico e amplitude térmica das diferentes soluções construtivas, para a estação de arrefecimento. ....	96
<b>Tabela 23</b> - Parâmetros considerados no estudo de sensibilidade. ....	107
<b>Tabela 24</b> - Temperatura interior e conforto térmico das estratégias S2, S5, S7, S8, S9, S14, S23 e S41, para a estação de aquecimento. ....	109
<b>Tabela 25</b> - Temperatura interior, conforto térmico e amplitudes térmicas diárias das estratégias S2, S5, S7, S8, S9, S14, S23 e S41, para a zona térmica ZT11, para a estação de arrefecimento. ....	113
<b>Tabela 26</b> - Análise estatística da temperatura interior da estratégia S39 e da solução original do caso de estudo, para a estação de aquecimento. ....	118
<b>Tabela 27</b> - Tempo de desconforto térmico da estratégia S39 e da solução original do caso de estudo, na estação de aquecimento. ....	120
<b>Tabela 28</b> - Estimativa do custo da estratégia de intervenção S39. ....	122
<b>Tabela 29</b> - Análise estatística da temperatura interior da estratégia S39 e da solução do caso de estudo, para a estação de arrefecimento. ....	124
<b>Tabela 30</b> - Tempo de desconforto térmico da estratégia S39 e da solução original do caso de estudo, para a estação de arrefecimento. ....	126





# Capítulo 1

---

INTRODUÇÃO



## **1. INTRODUÇÃO**

1.1. Enquadramento

1.2. Objectivos

1.3. Organização e Estrutura da Dissertação



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Enquadramento

O parque edificado português, em particular o do sector residencial, é genericamente um parque envelhecido. Cerca de 40% deste apresenta necessidades de reparação, ou mesmo intervenções de fundo, que visem melhorar as suas características de habitabilidade, pois praticamente todos eles foram construídos antes da existência da regulamentação térmica de edifícios (Anselmo *et al.*, 2004).

Em Portugal, nos últimos anos, a conservação e reabilitação dos edifícios apenas representou 20% do investimento total realizado no sector da construção, enquanto a média da União Europeia é cerca de 40% (Silva *et al.*, 2012).

Para além destes pontos negativos acerca do edificado português, existem previsões que indicam que os edifícios construídos até 1990 contribuirão, em 2050, com mais de 80% dos consumos neste sector, se neles não forem feitas quaisquer intervenções de reabilitação energética (Almeida *et al.*, 2012).

Devido à problemática da eficiência energética a nível global, a União Europeia tem procurado respostas, produzindo medidas e planos estratégicos, acompanhados por Directivas Europeias que pretendem ter um grande impacto ao nível da melhoria da eficiência energética dos edifícios, do desenvolvimento e incentivo ao uso das energias renováveis e da diminuição dos gases do efeito de estufa. Em Maio de 2010 entrou em vigor a Directiva 2010/31/EU, *Energy Performance of Buildings Directive* (EPBD, 2010), reformulação da directiva existente referente a 2002, que define a estratégia de 20-20-20. Esta tem como objectivo reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 20% até 2020 e em 80% até 2050, em relação aos níveis de emissões de 1990, a fim de alcançar as metas traçadas no Protocolo de Quioto, sendo portanto, necessário realizar intervenções de reabilitação energética (Sousa *et al.*, 2012). Segundo a directiva, os Estados Membros deverão assegurar que, até 31 de Dezembro de 2020, todos os edifícios novos sejam edifícios com necessidades quase nulas de energia, *Nearly Zero Energy Buildings* (NZEB), e que após 31 de Dezembro de 2018, os edifícios novos ocupados e detidos por autoridades públicas, sejam edifícios com necessidades quase nulas de energia.

Urge, portanto, adaptar as construções a condições de habitabilidade e de conforto térmico aos níveis de exigência pretendidos pela regulamentação, melhorando o

desempenho térmico e energético, ou seja, reabilitar os edifícios a nível térmico e energético. Esta necessidade reflecte-se também nos edifícios de alvenaria de terra, apesar destes possuírem características vantajosas como a capacidade de inércia térmica, contribuindo, em parte, para um adequado conforto térmico interior e para a minimização do consumo de energia.

O desconhecimento destas potencialidades, por parte da população em geral e técnicos projectistas, leva à desvalorização da reabilitação deste tipo de edifícios, sendo a demolição uma das primeiras estratégias a ser ponderada (Tavares *et al.*, 2011).

A actual regulamentação térmica apresenta desafios nos processos de reabilitação térmica do edificado de adobe existente, pois é necessário desenvolver estratégias de intervenção que conciliem a preservação do património em terra com a melhoria das condições de conforto e do desempenho térmico e energético, tirando o maior partido do material (adobe) que confere uma boa inércia térmica ao edificado, principalmente no período de Verão. Para além de que é necessário dotar os técnicos de conhecimentos que lhes permitam responder às exigências regulamentares.

Relativamente à construção em adobe na região de Aveiro, particularmente em Ílhavo, é conhecido que ao longo da primeira metade do século XX o sistema tradicional construtivo foi sofrendo alterações devido ao aparecimento das indústrias dos cimentos e tijolo cerâmico, bem como ao aparecimento e introdução do sistema porticado de betão armado. Posteriormente caiu em desuso, sofrendo o seu declínio na segunda metade do século XX (Tavares *et al.*, 2012a). No entanto, estas alterações, que consistiam na introdução dos novos materiais no sistema construtivo, foram implementadas sem que tenha existido uma preocupação ao nível do comportamento térmico e energético da habitação.

## 1.2. Objectivos

Tendo em conta o enquadramento descrito na secção anterior e tendo conhecimento que cerca de um terço da população Mundial vive em edifícios de terra, estimado por Houben e Guillard. Particularmente na região de Aveiro (Portugal), de acordo com informação da Câmara Municipal, cerca de 25% dos edifícios existentes na cidade são de adobe, sendo que relativamente a todo o distrito, a percentagem sobe para os 40% (Varum

*et al.*, 2007). O presente trabalho tem como principal objectivo a caracterização do comportamento térmico e energético de um edifício em adobe no seu estado actual e, posteriormente, a definição e análise de estratégias de reabilitação térmica e energética que melhorem os níveis de conforto térmico.

O segundo objectivo é perceber se as soluções construtivas das paredes da envolvente exterior que vieram sendo implementadas ao longo da primeira metade do século XX, em detrimento do sistema tradicional de adobe, conferem melhorias ao nível térmico e energético.

De modo a cumprir os objectivos e a garantir uma avaliação mais precisa das estratégias e soluções, será utilizada uma ferramenta informática de análise dinâmica, nomeadamente o programa *EnergyPlus* cujo modelo será validado pelos dados obtidos através da monitorização *in situ* já realizada, no espaço de um ano. Os dados fornecidos para a realização do presente trabalho são os relativos à monitorização *in situ* (temperaturas interiores, exteriores e humidade relativa), caracterização geométrica do edifício, bem como algumas informações sobre os hábitos de ventilação e aquecimento/arrefecimento do mesmo.

A análise do desempenho térmico será elaborada com base nos critérios de conforto definidos em regulamentação própria, segundo a norma EN15251 (CEN, 2007) e o regulamento nacional REH (DL n.º118/2013).

### **1.3. Organização e Estrutura da Dissertação**

No **capítulo 1** é apresentada uma breve descrição da situação do edificado português e a importância da reabilitação térmica e energética. É feita referência à legislação nacional relativa ao comportamento térmico e energético e referida a construção em adobe existente na região de Aveiro, particularmente em Ílhavo, fazendo alusão à sua evolução construtiva.

No **capítulo 2** é feita uma sintética abordagem teórica acerca das temáticas: construção em alvenaria de adobe; comportamento térmico e energético; simulação dinâmica; reabilitação térmica e energética.

O **capítulo 3** diz respeito à caracterização do caso de estudo, apresentando na última secção a monitorização da temperatura e humidade relativa interior e exterior do edifício em estudo. A monitorização que é utilizada nesta dissertação, foi executada pela aluna

Diana Cancela no desenvolvimento da dissertação de mestrado que abordou e estudou o comportamento higrotérmico do edifício em estudo (Cancela, 2013).

O **capítulo 4** é dedicado ao procedimento que conduziu à criação do modelo numérico, representativo do edifício em estudo, encontrando-se dividido nas seguintes secções: definição do modelo geométrico; construção do ficheiro climático para a validação e apresentação dos dados climáticos para a simulação; caracterização dos materiais; quantificação dos ganhos internos, sistemas de climatização, sistemas de ventilação e mobiliário; definição dos padrões de utilização do edifício. O capítulo encerra com uma secção em que se descreve a fase da validação do modelo e se apresentam os registos resultantes, de temperatura interior.

No **capítulo 5** é apresentada a análise do comportamento térmico e energético da solução original do caso de estudo, tendo como base o regulamento nacional, REH (DL n.º118/2013), e a norma EN 15251 (CEN, 2007). Sendo, posteriormente estudado o impacto que a evolução do sistema construtivo das paredes exteriores em adobe, produziu em termos térmicos e energéticos, comparando os resultados com os do edifício original.

O **capítulo 6** engloba a análise do comportamento térmico e energético das estratégias de reabilitação seleccionadas, fazendo a análise comparativa entre a estratégia com melhores resultados e o edifício em estudo (solução original).

Por fim, no **capítulo 7** são apresentadas as conclusões retiradas da análise realizada nos dois capítulos anteriores.

São ainda apresentados dois anexos no final da dissertação, no primeiro, Anexo A, encontram-se as plantas do edifício em estudo que foram realizadas no desenvolvimento de uma dissertação de mestrado, por Diana Cancela (Cancela, 2013). No Anexo B são apresentados os resultados da percentagem de tempo de desconforto, das simulações das estratégias de reabilitação, para todas as zonas térmicas habitáveis, por forma a auxiliar a análise dos resultados.



## Capítulo 2

ESTADO DA ARTE

## **2. ESTADO DA ARTE**

### 2.1. Construção em alvenaria de adobe

#### 2.1.1. A construção na região de Aveiro

#### 2.1.2. Técnicas de construção

#### 2.1.3. Sistema construtivo e sua evolução

#### 2.1.4. Potencial da construção em alvenaria de terra

### 2.2. Comportamento térmico e energético de edifícios

#### 2.2.1. Legislação nacional

#### 2.2.2. Conforto térmico interior

##### 2.2.2.1. Quantificação do conforto térmico

##### 2.2.2.2. Norma EN 15251 – Metodologia do modelo adaptativo

#### 2.2.3. Inércia térmica e Ventilação

### 2.3. Simulação dinâmica

#### 2.3.1. Simulação dinâmica do comportamento térmico e energético de edifícios

#### 2.3.2. O programa *EnergyPlus*

### 2.4. Estratégias de reabilitação

#### 2.4.1. Reabilitação térmica e energética

##### 2.4.1.1. Medidas passivas e activas

#### 2.4.2. Reabilitação térmica e energética dos elementos construtivos da envolvente externa

## **2. ESTADO DA ARTE**

Neste capítulo encontra-se o estado da arte sobre as matérias relacionadas com o tema da dissertação. Inicialmente apresenta-se o tema da construção em alvenaria de terra, indicando a localização geográfica em Portugal, descrevendo algumas técnicas, a evolução do sistema construtivo e as suas potencialidades. Posteriormente, apresentam-se pontos importantes relativos ao comportamento térmico e energético, elucidando sobre a legislação nacional e o que esta exige em caso de reabilitação dos edifícios. É também apresentada uma breve descrição sobre simulação dinâmica e as funcionalidades do programa *EnergyPlus*, sendo, por fim, expostos alguns princípios básicos para a realização de estratégias de reabilitação térmica e energética, em particular de edifícios de adobe.

### **2.1. Construção em alvenaria de adobe**

#### **2.1.1. A construção na região de Aveiro**

Em Portugal existem diferentes técnicas de construção em terra, esta variedade resulta de múltiplos condicionalismos, como geográficos, económicos, sociais, históricos e culturais, sendo os aspectos climáticos e a disponibilidade das matérias-primas os que definiram a sua distribuição geográfica (Mendonça, 2005). As técnicas tradicionais são a taipa, o adobe e o tabique. Na zona sul do país (Alentejo e Algarve) predomina a construção em taipa, o adobe é extensamente utilizado em zonas relativamente próximas de rios (zona litoral) onde existe maior facilidade de acesso aos seus materiais constituintes, e o tabique é utilizado nas zonas interiores do norte. Esta distribuição geográfica é visível na Figura 1.

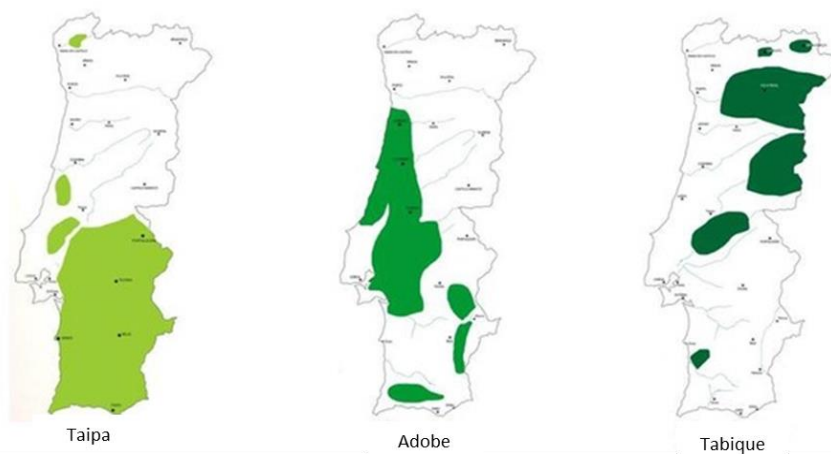


Figura 1 - Distribuição geográfica das técnicas construtivas em terra, em Portugal. Adaptado de (Torgal & Jalali, 2009b).

Na região de Aveiro predomina a técnica de construção em adobe devido à sua localização no centro litoral que permitiu a construção de um vasto património com este material. De acordo com informação da Câmara Municipal, cerca de 25% dos edifícios existentes na cidade são de adobe. Relativamente a todo o distrito, a percentagem sobe para os 40%, representando uma percentagem significativa que reflecte a importância deste sistema construtivo em áreas rurais (Varum *et al.*, 2007).

### 2.1.2. Técnicas de construção

Existem diversas técnicas de construção em terra no mundo inteiro, no entanto é possível destacar três delas, a construção em adobe, em taipa e o bloco de terra compactado (BTC), que surgiu de uma evolução do adobe (Jalali & Eires, 2008).

É de salientar que o material utilizado como matéria-prima na construção em terra consiste somente na fase mineral dos solos. Esta fase é constituída por partículas minerais de tamanho variável, como argilas, siltes e material arenoso, que se encontram misturadas entre si também em proporções variáveis (Torgal & Jalali, 2009a).

Relativamente ao adobe, esta é a técnica mais comum, sendo utilizada em locais onde é possível encontrar água, uma vez que é necessário um solo plástico e argiloso. O seu fabrico consiste na moldagem de blocos utilizando moldes em metal ou madeira, que são desmoldados ainda no estado fresco e colocados a secar à temperatura ambiente, a Figura 2 ilustra estas duas etapas. Depois da desmoldagem os blocos são virados frequentemente

para que a cura seja constante em todas as faces. Devido à tendência do solo argiloso criar fissuras quando seca, originadas pela retracção do material, é usual reforçar o adobe misturando palha ou fibras vegetais para evitar este comportamento (Jalali & Eires, 2008). A alvenaria de adobe pode ser executada com diferentes espessuras, em função da geometria dos blocos de adobe mas particularmente em função do modo como são dispostos (à meia vez ou a uma vez no caso de paredes divisórias interiores e a uma vez e meia ou a duas vezes, mais corrente em paredes exteriores portantes) (Rodrigues, 2007).



a)



b)

Figura 2 - a) Moldagem de blocos de adobe (TPS, 2015); b) Cura de blocos de adobe.

A taipa constitui uma estrutura monolítica de paredes que resulta da compactação de terra entre cofragem, designada por “taipais”, em camadas estreitas, até se atingir o limite superior do taipal. A baixa percentagem de água necessária na sua composição, marca zonas bastante características, como é o exemplo do Alentejo e do Algarve, em Portugal, que comparativamente ao resto do país são regiões bastante secas. Por último, o bloco de terra compactado (BTC) produz-se pela prensagem do solo confinado num molde, permitindo obter maior resistência e durabilidade, em comparação com o adobe (Jalali & Eires, 2008).

### 2.1.3. Sistema construtivo e sua evolução

Em Portugal, nomeadamente na região de Ílhavo, o sistema tradicional de construção em adobe começou a sofrer alterações no início do século XX, devido a influências exteriores, consequentes da imigração. Mas também devido à industrialização na região,

indústrias dos cimentos e tijolo cerâmico e ao aparecimento e introdução do sistema porticado de betão armado (Tavares *et al.*, 2011).

As influências exteriores reflectiram-se na arquitectura de edifícios novos em adobe, período *Art Nouveau* observado entre 1910 e 1920, e na organização dos espaços interiores, enquanto o aparecimento dos novos materiais se reflectiu na alteração do sistema construtivo, pela introdução dos novos materiais quando realizadas intervenções de reabilitação, mas também em construção nova, esta alteração começa a surgir a partir de 1930 (Tavares *et al.*, 2012a).

Na Figura 3 exhibe-se a arquitectura de um edifício rural e de um edifício urbano construídos antes do período em que surgem as alterações no sistema construtivo, Figura 3 a) e Figura 3 b), respectivamente. Exibe-se um outro edifício apresentando uma arquitectura com influências da imigração, Figura 3 c), por último, um edifício apresentando uma arquitectura típica do período *Art Nouveau*, Figura 3 d).



a)



b)



c)



d)

Figura 3 - Arquitectura de edifícios de adobe em Ílhavo. a) Edifício rural; b) Edifício urbano; c) Edifício urbano com influências da imigração; d) Edifício *Art Nouveau* (crédito: Alice Tavares)

O sistema construtivo tradicional de adobe, ver Figura 4 a), consiste em fundações directas, de pedra, adobe ou tijolo maciço, paredes exteriores em adobe com espessuras

que variam entre 0.3 a 0.8 metros, dependendo do número de pisos e altura do pé-direito, e paredes divisórias normalmente em tabique ou de tijolo com espessuras que variam entre 0.10 a 0.15 metros. A estrutura de piso e da cobertura é realizada com elementos de madeira. Era uma solução corrente nas construções de adobe a utilização de caves ou pisos térreos de muito baixa altura ou simplesmente uma caixa-de-ar com aberturas para o exterior de modo a permitir a ventilação da base das paredes e da estrutura de madeira de piso (Tavares *et al.*, 2011).

As alterações no sistema construtivo de edifícios em adobe foram-se registando de forma progressiva, inicialmente foram introduzidos elementos como o anel de viga em betão armado (com a aplicação de dois ou três ferros transversais, para melhorar o funcionamento mecânico das paredes) e a platibanda, esta executada na fachada principal, normalmente em adobe, tijolo ou pedaços cerâmicos. Outra diferença em relação ao sistema tradicional foi a substituição das paredes interiores em tabique por paredes em tijolo de três furos, assim como a redução da espessura das paredes de adobe. O resultado destas modificações encontra-se esquematizado na Figura 4 b).

Mais tarde surgiu a introdução de elementos estruturais em betão armado, como pilares, vigas e lajes no caso de áreas de serviço, varandas e terraços. A cavidade com o sistema de ventilação é mantida mas o piso térreo passa a conter uma camada de argamassa de betão normalmente revestida com material cerâmico. Nesta altura observa-se também o reforço dos cunhais e nem sempre a existência de paredes divisórias em tijolo nos andares superiores. O resultado destas modificações encontra-se esquematizado na Figura 4 c).

Por fim, entre 1940 e 1950 surgem edifícios com um sistema híbrido, que resulta de projectos de extensões. Neste caso o adobe é utilizado na ampliação nos espaços existentes ao nível do piso térreo, mas sobre estas paredes em adobe são realizadas lajes em betão armado e as paredes passam a ser realizadas em tijolo cerâmico. A fase inicial do Modernismo começou com este sistema que se esquematiza na Figura 4 d) (Tavares *et al.*, 2012b).

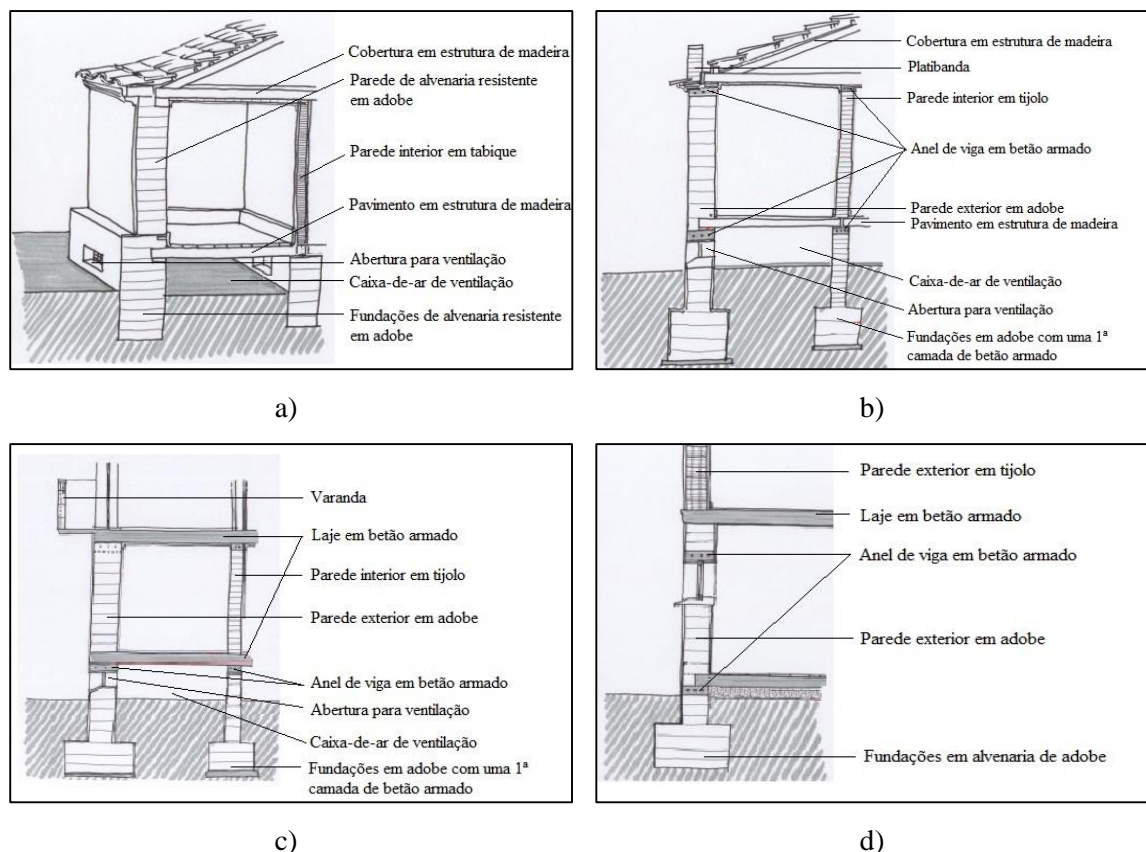


Figura 4 – Evolução do sistema construtivo de adobe em Ílhavo; a) Sistema tradicional; b) Sistema com introdução de anéis de viga em betão armado; c) Sistema com introdução de lajes em betão armado; d) Sistema híbrido. Adaptado de (Tavares *et al.*, 2012b)

A argamassa utilizada na aplicação dos tijolos cerâmicos era concretizada com cal e areia ou cimento e areia. Apesar desta evolução no sistema construtivo, não se deixou completamente de se construir segundo o sistema tradicional (Tavares *et al.*, 2012a).

#### 2.1.4. Potencial da construção em alvenaria de terra

A construção em terra apresenta muitas potencialidades, como o elevado conforto térmico, o bom comportamento acústico e a economia energética inerente, bem como a longevidade da construção, quando preservado, e o facto de ser reciclável, uma vez que não há produção de entulhos industriais. As primeiras duas potencialidades devem-se às características intrínsecas do material que apresenta uma considerável massa, que se traduz numa boa inércia térmica. A economia energética dá-se em termos de produção e de transporte, assim como na utilização da construção (Rodrigues, 2007).



Para além destas, ainda apresenta salubridade, por ser um material natural, sem tóxicos, com boas propriedades higrotérmicas que permitem que o edifício respire, não causando condensações. Contudo, para se conseguir esta vantagem do material é necessário garantir a utilização de argamassas de propriedades semelhantes à base de terra e cal, com o mínimo de cimento, diminuindo o risco de fissuras e mantendo a permeabilidade ao vapor de água (Jalali & Eires, 2008). É, assim, um material economicamente viável e ecológico.

No entanto, a construção em terra também apresenta algumas desvantagens, pois se não for devidamente concebida e reforçada pode apresentar uma resposta deficiente quando sujeita a acções cíclicas (ex. sismos), sofrendo danos estruturais severos. Também exige mão-de-obra qualificada e se a construção não for adequadamente protegida, torna-se vulnerável à deterioração, sendo a água um dos seus principais elementos agressores (Varum *et al.*, 2007).

Os blocos de terra são capazes de absorver 10 vezes mais humidade do ar, comparativamente a tijolos cerâmicos tradicionais. A higroscopicidade (capacidade que os materiais possuem em absorver água) dos materiais de construção, por vezes é mais eficaz na redução da humidade do ar interior do que a utilização de ventilação. Atentando a valores, a construção em terra é capaz de manter os níveis de humidade interior entre 40 a 60%. Este intervalo de valores de humidade interior é o que se pretende, para efeitos de saúde humana, as habitações com valores de humidade fora deste intervalo são propícias ao aparecimento de doenças do foro respiratório (Torgal *et al.*, 2009d).

## **2.2. Comportamento térmico e energético de edifícios**

O comportamento térmico dos edifícios é um processo dinâmico, desfasado temporalmente face às acções térmicas exteriores, logo, complexo de prever e quantificar. Tais características devem-se ao balanço entre perdas e ganhos de energia que é condicionado pelas propriedades e características dos elementos de construção (massa e taxa de condução do calor) (Rodrigues *et al.*, 2009). São diversos os factores que afectam o comportamento térmico dos edifícios e existem interdependências entre os parâmetros que os caracterizam, os factores são: condições ambientais exteriores; condições ambientais interiores; características construtivas; características funcionais (Santos, 1989).

### 2.2.1. Legislação Nacional

A Directiva Comunitária 2002/91/CE, conhecida por EPBD, *Energy Performance of Buildings Directive* foi o primeiro regulamento europeu sobre o desempenho energético dos edifícios. Esta foi transposta, em 2006, para a Ordem Jurídica Nacional através de um pacote legislativo composto por três Decretos-Lei: o Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios (SCE, 2006), o Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE, 2006) e o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE, 2006).

Em Maio de 2010 foram aprovadas as reformulações feitas à directiva anterior passando a Directiva 2010/31/EU do Parlamento Europeu e do Conselho, (EPBD,2010), a ter como principal objectivo o desenvolvimento de planos nacionais para aumentar o número de edifícios com necessidades quase nulas de energia (NZEB - *Nearly Zero Energy Buildings*). Segundo esta directiva, os Estados Membros deverão assegurar que, todos os edifícios novos de entidades públicas até 2018 e todos os edifícios, públicos e privados, até 2020 devam ser edifícios com necessidades quase nulas de energia, ou seja, os edifícios têm que passar a ter sistemas energéticos renováveis, no edifício ou nas suas proximidades que produzam parte da energia consumida pelo edifício, seja térmica ou eléctrica.

A transposição para o direito nacional desta directiva gerou uma revisão da legislação nacional existente tendo sido desenvolvido um único diploma que inclui o Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE), o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) e o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS), o Decreto-Lei n.º 118/2013 (DL n.º118/2013).

O REH (DL n.º118/2013), contido no capítulo III do referido decreto-lei, tem como objectivo, segundo o seu artigo 22º, estabelecer os requisitos para os edifícios de habitação, novos ou sujeitos a intervenções, bem como os parâmetros e metodologias de caracterização do desempenho energético, em condições nominais, de todos os edifícios de habitação e dos seus sistemas técnicos, no sentido de promover a melhoria do respectivo comportamento térmico, a eficiência dos seus sistemas técnicos e a minimização do risco de ocorrência de condensações superficiais nos elementos da envolvente.

Relativamente à reabilitação, o REH (DL n.º118/2013) exige que os edifícios que necessitem de uma grande intervenção, isto é, intervenção cujo custo da obra de ampliação ou da obra relacionada com a envolvente ou com os sistemas técnicos preexistentes seja superior a 25% do valor da totalidade do edifício, obtenham uma declaração de conformidade regulamentar vinculativa, onde os valores máximos impostos pelo REH não podem ser ultrapassados. Para os edifícios que não necessitam de obras de reabilitação, renovação ou requalificação, ou cujo valor não ultrapasse 25% do custo da totalidade do edifício, é exigido um certificado energético, apenas informativo, pois neste caso é permitido que os valores máximos admissíveis pelo REH sejam ultrapassados.

Segundo a portaria n.º 349 – B/2013, a relação entre os valores de necessidades nominais e o seu limite, de energia útil para aquecimento, arrefecimento e energia primária, de edifícios sujeitos a grandes intervenções, deve verificar as condições presentes na Tabela 1, em função do ano de construção do edifício. O regulamento ainda impõe para estes edifícios, valores máximos admissíveis do coeficiente de transmissão térmica de elementos opacos da envolvente, estes encontram-se expostos na Tabela 2.

Para edifícios localizados em zonas históricas ou em edifícios classificados, o regulamento REH concede uma exceção na legislação.

Tabela 1 - Valores máximos impostos para as necessidades de aquecimento, arrefecimento e energia primária para edifícios sujeitos a grandes intervenções, segundo o REH (DL n.º118/2013).

Ano de construção	$N_{ic}/N_i$	$N_{vc}/N_v$	$N_{tc}/N_t$
Anterior a 1960	Não aplicável	Não aplicável	1.50
Entre 1960 e 1990	1.25	1.25	1.50
Posterior a 1990	1.15	1.15	1.50

Tabela 2 - Coeficientes de transmissão térmica máximos admissíveis de elementos opacos, segundo o REH (DL n.º118/2013).

$U_{\text{máx}}$ [W/(m <sup>2</sup> °C)]		Zona climática		
		I1	I2	I3
Elementos da envolvente em contacto com o exterior ou espaços não úteis com $b_{tr} \leq 0.7$	Elementos verticais	1.75	1.60	1.45
	Elementos horizontais	1.25	1.00	0.90
Elementos da envolvente em contacto com outros edifícios ou espaços não úteis com $b_{tr} \leq 0.7$	Elementos verticais	2.00	2.00	1.90
	Elementos horizontais	1.65	1.30	1.20

Relativamente à regulamentação portuguesa sobre a construção em terra, esta não existe, mas existem vários países que já a possuem (Torgal & Jalali, 2009c).

### 2.2.2. Conforto térmico interior

O conforto térmico é uma medida subjectiva e pode ser definido como “o estado de espírito que expressa satisfação com o ambiente térmico” (ASHRAE, 2004). Para que tal aconteça, a condição básica necessária é a de que o sistema termo-regulador do organismo humano se encontre em equilíbrio com o ambiente (Rodrigues *et al.*, 2009). Segundo o REH (DL n.º118/2013), para atingir este estado de espírito em edifícios de habitação é necessário que a temperatura ronde os 18°C para a estação de aquecimento e os 25°C para a estação de arrefecimento, pois estas são as temperaturas de referência de conforto.

O estado de neutralidade térmica dependerá fundamentalmente dos factores relacionados com o ambiente, logo, a temperatura do ar, temperatura radiante média, velocidade do ar e humidade relativa do ar. Assim como dependerá dos factores relacionados com o tipo de ocupação, factores pessoais, ou seja, nível de actividade (metabolismo) e tipo de vestuário (resistência térmica do vestuário) (Rodrigues *et al.*, 2009). Para além destes, a percepção de conforto térmico também depende de questões socioculturais e psicológicas relacionadas com as diferenças na percepção e na resposta a estímulos sensoriais (Matias, 2010).

A satisfação das exigências de conforto térmico interior, assente em determinados padrões definidos, tendo em conta uma perspectiva de custo-qualidade e a preocupação de redução de consumos energéticos, pode ser alcançada desde que no projecto sejam contempladas determinadas disposições construtivas, essencialmente relacionadas com a envolvente dos edifícios (Santos, 1989).

Para uma maior eficiência energética dos edifícios deve considerar-se as características climáticas da zona em que este está inserido, portanto, deve ter-se em conta a localização, a envolvente, a vegetação, o vento e a exposição solar, pois tal favorece as exigências funcionais de habitabilidade, mas também a situação de conforto térmico, levando à pretendida eficiência energética (Braga & Rocheta, 2008).

#### **2.2.2.1. Quantificação do conforto térmico**

A quantificação do conforto térmico pode ser obtida segundo diferentes métodos, segundo uma abordagem analítica ou segundo uma abordagem adaptativa.

A abordagem analítica foi desenvolvida por Povl Ole Fanger que se baseou na premissa de que as sensações experimentadas eram uma função do esforço fisiológico impostas pelo ambiente. Desta forma a abordagem deriva das condições de estado estacionário de trocas térmicas entre o corpo humano e o ambiente envolvente, tendo sido criado um índice de conforto, *Predicted Mean Vote* (PMV) e um índice que estima a percentagem previsível de insatisfeitos, *Predicted Percentage of Dissatisfied* (PPD). O índice PMV é traduzido como voto médio previsível e quantifica o conforto interior exprimindo a sensibilidade humana ao frio e ao calor conforme uma escala que vai de mais três (+3) a menos três (−3), muito quente a muito frio, respectivamente (Almeida, 2010).

Este modelo foi alcançado através de ensaios experimentais realizados em câmaras climáticas em que as variáveis ambientais eram ajustadas e combinadas, nestas eram medidas a taxa de secreção de suor e a temperatura da pele (esforço fisiológico) dos indivíduos, que se encontravam em estado de conforto (Jerónimo, 2014).

Ao contrário da primeira, a abordagem adaptativa baseia-se em trabalho de campo e na premissa de que as sensações térmicas não são apenas o resultado de parâmetros fisiológicos mas também de factores psicológicos que permitem ao ocupante interagir com o meio envolvente (Almeida, 2010). Segundo Humphreys e Nicol (1998), se existir uma mudança no ambiente que gere uma situação de desconforto, as pessoas reagem de modo a

restaurar a seu conforto (Nicol, & Roaf, 2007). O ocupante desempenha, portanto, um papel determinante na criação do seu próprio ambiente térmico, através da forma como interage com o meio em que se encontra, alterando o seu próprio comportamento e adaptando gradualmente as suas expectativas às condições ambientais existentes (Brager & de Dear, 1998). A abordagem adaptativa preconiza, então, que a obtenção das condições de conforto térmico resulta de um processo dinâmico.

Existem diferentes normas que quantificam o conforto térmico, como exemplo a ASRAE 55 (2004), a ISO 7730 (2005), a EN 15251 (CEN, 2007) e a ISO/TS 14415 (2005).

Para a quantificação do conforto térmico, no presente trabalho, é utilizada a norma EN 15251 (CEN, 2007), nomeadamente o modelo adaptativo relativo a edifícios sem sistemas mecânicos de arrefecimento, sendo em seguida feita uma breve descrição da norma e da sua metodologia para avaliar o conforto térmico.

#### **2.2.2.2. Norma EN 15251 - Metodologia do modelo adaptativo**

A Norma Europeia EN15251 (CEN, 2007) foi criada no âmbito de um mandato conferido ao CEN (*Comité Européen de Normalisation*) pela *European Commission* e pela *European Free Trade Association* (Mandato M/343), abrangendo os requisitos essenciais da Directiva 2002/91/CE (EPBD) e regula a qualidade do ambiente interior em edifícios, em termos térmicos, qualidade do ar, iluminação e ruído. Portugal faz parte da série de países europeus que deverá implementar a norma de acordo com o CEN (CEN, 2007).

O modelo adaptativo apenas se aplica a espaços onde os ocupantes desenvolvam actividades sedentárias com uma taxa metabólica entre 1,0 e 1,3 met. E estabelece quatro categorias em função do grau de exigência de conforto para determinado tipo de edifício, cada categoria corresponde a um determinado limite inferior e superior de temperaturas de conforto. As categorias são as seguintes:

- Categoria I – relativa a um elevado nível de expectativa, sendo recomendada para espaços ocupados por pessoas muito sensíveis e frágeis com requisitos especiais;
- Categoria II – relativa ao nível normal de expectativa, sendo recomendado para edifícios novos e reabilitados;

- Categoria III – relativa ao nível aceitável de expectativa de conforto, sendo recomendado para edifícios já existentes;
- Categoria IV – relativa a valores que se encontrem fora do critério das restantes categorias. Esta categoria deve ser apenas aceite para períodos limitados do ano.

A Figura 5 ilustra os limites de temperatura, para a estação de arrefecimento.

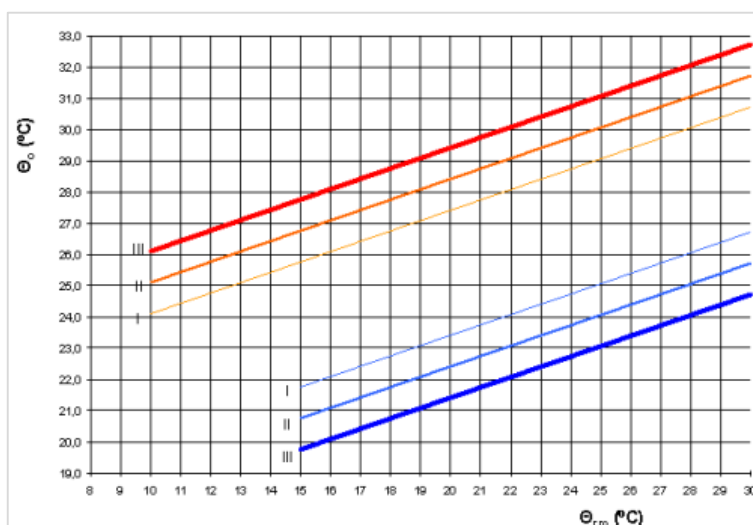


Figura 5 - Limites de conforto para a estação de arrefecimento da norma 15251 (CEN, 2007).

Estes limites são representados por rectas cujas equações são as seguintes:

#### Categoria I

$$\text{Limite superior: } \theta_{i \text{ máx}} = 0.33 \times \theta_{rm} + 18.8 + 2$$

$$\text{Limite inferior: } \theta_{i \text{ mín}} = 0.33 \times \theta_{rm} + 18.8 - 2$$

#### Categoria II

$$\text{Limite superior: } \theta_{i \text{ máx}} = 0.33 \times \theta_{rm} + 18.8 + 3$$

$$\text{Limite inferior: } \theta_{i \text{ mín}} = 0.33 \times \theta_{rm} + 18.8 - 3$$

#### Categoria III

$$\text{Limite superior: } \theta_{i \text{ máx}} = 0.33 \times \theta_{rm} + 18.8 + 4$$

$$\text{Limite inferior: } \theta_{i \text{ mín}} = 0.33 \times \theta_{rm} + 18.8 - 4$$

Em que

$\theta_i$  – Temperatura operativa de conforto (°C);

$\theta_{rm}$  – Temperatura média exterior ponderada (°C).

A temperatura média exterior ponderada é determinada com base nos valores das temperaturas médias diárias da semana precedente, pois parte-se do princípio que o intervalo de tempo característico, em que um indivíduo demora a ajustar-se totalmente às alterações climáticas exteriores é de, aproximadamente, uma semana. Este valor é, portanto, calculado segundo a seguinte equação:

$$\theta_{rm} = \frac{(\theta_{n-1} + 0,8\theta_{n-2} + 0,6\theta_{n-3} + 0,5\theta_{n-4} + 0,4\theta_{n-5} + 0,3\theta_{n-6} + 0,2\theta_{n-7})}{3,8} \quad (1)$$

Em que

$\theta_{rm}$  – Temperatura média exterior ponderada (°C);

$\theta_{n-i}$  – Temperatura média exterior do dia (i) anterior (°C).

Relativamente à estação de aquecimento, para temperaturas inferiores a 15°C, os valores a considerar são os mesmos para os edifícios com meios mecânicos de aquecimento, ou seja, para edifícios residenciais são os apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores de temperatura de projecto segundo a norma EN 15251 (CEN, 2007).

Tipo de espaço	Categoria	Temperatura operativa	
		Temperatura mínima para aquecimento (estação de aquecimento) $\approx 1$ clo	Temperatura mínima para arrefecimento (estação de arrefecimento) $\approx 0.5$ clo
Edifícios residenciais: zonas úteis Actividade sedentária $\approx 1.2$ met.	I	21	25.5
	II	20	26
	III	18	27
Edifícios residenciais: zonas não-úteis Actividade sedentária $\approx 1.5$ met.	I	18	-
	II	16	-
	III	14	-

O caso de estudo insere-se na categoria III por ser um edifício já existente, assim para a estação de aquecimento terá como temperatura mínima de conforto 18°C, para



temperaturas exteriores inferiores a 15°C, e terá como temperatura máxima de conforto 27°C, para temperaturas exteriores inferiores a 10°C.

### 2.2.3. Inércia Térmica e Ventilação

O conceito de inércia térmica representa a resistência oferecida pelos sistemas térmicos à tentativa de alterar o seu estado termodinâmico. Por outras palavras, a inércia térmica é traduzida pela capacidade que os materiais possuem em armazenar calor. Nos edifícios, devido ao carácter periódico das solicitações, esta resistência manifesta-se por um amortecimento das ondas de calor e por um desfasamento entre as solicitações e a resposta do edifício (Lima, 1995).

Os materiais com elevada massa térmica conseguem absorver, armazenar e libertar grandes quantidades de energia, ajudando a manter a temperatura do ar interior estável (Allinson & Hall, 2010). Durante o dia, o calor resultante da incidência directa da radiação solar é absorvido pela massa térmica e, durante a noite, este calor é devolvido ao espaço. Quanto maior for a massa térmica, menor será a variação da temperatura interior (amplitude térmica), mas também será mais difícil aquecer o edifício. Logo, é necessário um equilíbrio entre massa térmica, isolamento e área de vãos, dependendo bastante do tipo de edifício e localização do mesmo (Gonçalves & Graça, 2004).

É importante que a capacidade de armazenamento térmico seja projectada, caso a caso, em função da geometria, do clima e do regime de ocupação pois esta capacidade condiciona significativamente o desempenho térmico de um edifício (Lima, 1995).

Para além da inércia térmica, a ventilação também traz benefícios para o desempenho térmico e qualidade do ar interior dos edifícios, pois tem por finalidade expulsar o ar interior viciado e substituí-lo por ar exterior novo (Finteiro, 1998).

Sendo, a renovação do ar interior, uma medida necessária à manutenção das condições de salubridade interior dos edifícios, deve ser sempre assegurado um mínimo recomendável através de um sistema de ventilação, natural, mecânico ou híbrido, adequado (Gonçalves & Graça, 2004). Segundo o REH (DL n.º118/2013) a taxa de renovação de ar, para garantia da qualidade do ar interior, deve ser igual ou superior a 0,4 renovações por hora.

A conjugação da inércia térmica com a ventilação, nomeadamente a ventilação nocturna, executa uma técnica de arrefecimento passivo na estação de arrefecimento. O

clima em Portugal caracteriza-se por amplitudes diárias, no Verão, que poderão atingir cerca de 20°C (dia-noite), sendo possível e desejável implementar a ventilação nocturna como uma estratégia muito eficaz de evacuação dos ganhos no interior dos edifícios (Gonçalves & Graça, 2004). Estes ganhos são os que provêm da libertação de calor pela massa estrutural que o armazenou ao longo do dia.

## 2.3. Simulação dinâmica

### 2.3.1. Simulação dinâmica do comportamento térmico e energético de edifício

E. Robert Shannon descreve em “*Systems simulation: The art and science*”, de 1975, que simulação é o processo de modelar um sistema real e realizar ensaios com esse modelo, para compreender o comportamento do sistema ou para avaliar várias estratégias para a operação do sistema. Ainda segundo o mesmo autor, o processo é uma metodologia experimental aplicada que procura descrever o comportamento do sistema, construir teorias ou hipóteses que expliquem o comportamento observado e usar essas teorias para prever o comportamento futuro (Pereira *et al.*, 2010).

A simulação numérica de um edifício reproduz um caso real através de um modelo que avalia o comportamento térmico quando submetido a diferentes condições que podem ser: factores ambientais, características dos materiais da envolvente do edifício, taxa de ocupação, iluminação, equipamentos, entre outras. Devido à facilidade na manipulação destas variáveis e ao tempo de processamento dos dados, a utilização de simulações computacionais é cada vez mais frequente nos dias de hoje (Carvalho, 2008).

Um modelo de simulação consegue prever o desempenho energético do edifício, sendo capaz de avaliar e determinar as medidas de conservação de energia mais eficientes e adequadas. Tal é útil, não só para o projecto dos edifícios, como também no contexto das acções de reabilitação térmica e energética (Oropeza-Perez *et al.*, 2012).

No entanto, a simulação numérica apresenta como desvantagem a dificuldade de encontrar dados (*inputs*) precisos relativos às propriedades dos materiais e condições de operação dos edifícios. Como consequência, os dados para a simulação são afectados por uma incerteza que pode afectar significativamente os resultados (*outputs*) e que tem de ser

considerada. Para que seja garantida a realidade e versatilidade dos resultados o programa requer um elevado número de parâmetros de entrada (Calleja Rodríguez *et al.*, 2013).

De uma perspectiva térmica, um edifício pode ser assimilado a um sistema complexo de capitâncias e resistências térmicas ligando diferentes regiões e representando, respectivamente, os processos de armazenamento e transmissão do calor que nelas ocorrem. A forma como este modelo é tratado matematicamente demarcará a flexibilidade e precisão da técnica utilizada. Em suma, as técnicas de cálculo utilizadas no domínio da térmica dos edifícios dividem-se em cinco categorias principais: regime permanente; simulação dinâmica simplificada; funções de resposta; métodos numéricos (diferenças finitas e elementos finitos); métodos analógicos. A técnica mais divulgada, pela sua simplicidade e facilidade de implementação, é a das diferenças finitas que trabalha a equação do calor directamente, por aproximação das suas derivadas às de uma série de Taylor truncada, ou indirectamente, por aplicação do princípio da conservação da energia a pequenos volumes de controlo (Rodrigues *et al.*, 2009).

É importante ter em atenção que o resultado da simulação está errado até prova em contrário. Na escolha do programa preferir os de referência, testados e validados, assim como aqueles com grande número de utilizadores (Lisboa, 2007).

### 2.3.2. O programa *EnergyPlus*

Para o desenvolvimento do presente trabalho utilizar-se-á o programa *EnergyPlus*, ferramenta informática de análise energética e de simulação de cargas térmicas (*EnergyPlus*, 2013c). O *EnergyPlus* permite simular o aquecimento, arrefecimento, iluminação, ventilação e outros fluxos de energia, assim como a água, nos edifícios. Inclui muitos recursos de simulação, como a análise de períodos de tempo inferiores a uma hora, sistemas modulares e planta integrada com a simulação de zona baseada em equilíbrio térmico, “*multizone air flows*”, conforto térmico, uso da água, ventilação natural e sistemas fotovoltaicos (*EnergyPlus*, 2015).

A criação deste programa foi incentivada pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos e baseou-se nos recursos e capacidades mais eficazes de outros dois programas, já existentes, o DOE-2 e o BLAST (*EnergyPlus*, 2013c).

O programa *EnergyPlus* consiste num conjunto de módulos que trabalham juntos para calcular a energia requerida para o aquecimento e arrefecimento de um edifício usando variados sistemas e fontes de energia. Na Figura 6 está esquematizada a organização dos diferentes módulos responsáveis por uma simulação.

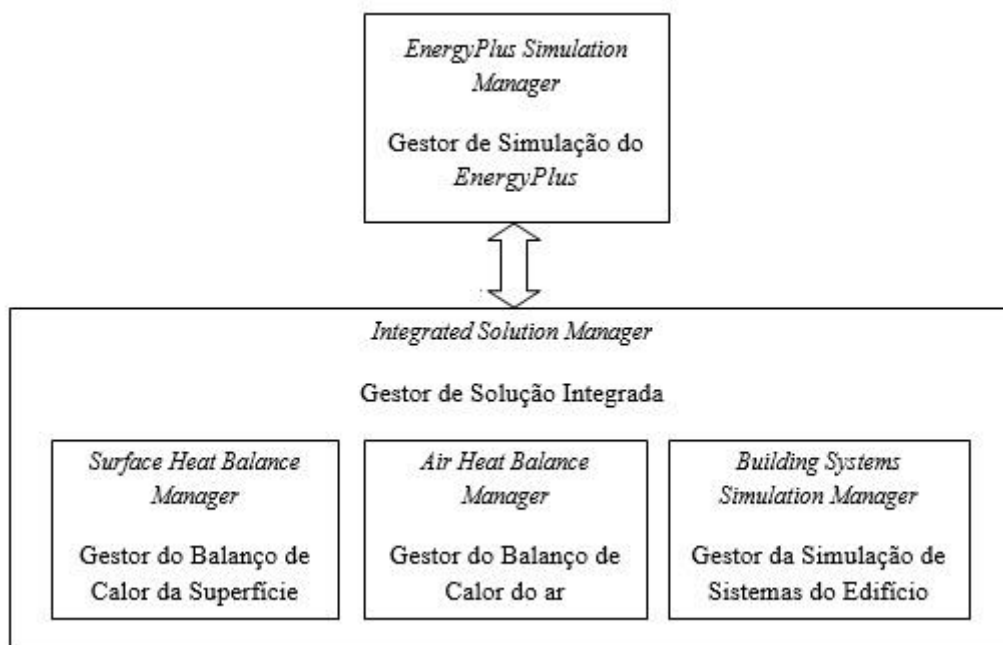


Figura 6 - Módulos internos do programa *EnergyPlus* e sua organização Adaptado de: (*EnergyPlus*, 2013a).

O estudo do balanço térmico envolve dois cálculos distintos (*EnergyPlus*, 2013a): o cálculo do balanço térmico interior à zona térmica considerada e o cálculo do balanço térmico superficial, ou seja, o estudo das trocas térmicas na superfície exterior e na superfície interior dos elementos construtivos envolventes à zona térmica.

Assim, torna-se estritamente necessário definir “zonas” e “ocupação de zonas”. As diferentes zonas podem interagir entre si pelas superfícies adjacentes, sendo esta interação possível através de fluxos de calor. As transferências de calor acontecem por condução, convecção e radiação, as transferências de massa acontecem por fenómenos de ventilação e de infiltração de ar. Dentro das zonas térmicas, ainda existe o ganho térmico interno resultante do funcionamento de sistemas de iluminação, equipamentos e da ocupação.

Relativamente ao cálculo do balanço térmico interior, o cálculo da temperatura interior resulta da aplicação da Lei da Termodinâmica, lei de conservação de energia, que traduz um balanço térmico para a zona térmica em análise.

Relativamente ao cálculo do balanço térmico superficial, existem três algoritmos de cálculo: *Conduction Transfer Function* (CTF); *Combined Heat and Moisture Transfer* (HAMT); *Effective Moisture Penetration Depth* (EMPD).

O modelo CTF avalia, em regime transiente, a transferência de calor sensível e despreza o armazenamento e a difusão de vapor através dos elementos de construção. Os modelos HAMT e EMPD constituem modelos permitem uma análise conjunta dos fenómenos de transmissão de calor, transporte de ar e de humidade nos edifícios e nos elementos de construção, em condições de serviço. No entanto, o modelo EMPD constitui uma simplificação do modelo HAMT, sendo necessário, neste último, uma caracterização detalhada das propriedades dos diversos materiais que constituem os elementos de construção (*EnergyPlus*, 2013a).

## **2.4. Estratégias de reabilitação**

### **2.4.1. Reabilitação térmica e energética**

A reabilitação térmica e energética integra medidas de economia de energia que podem ser essencialmente de quatro tipos: reforço da protecção térmica conferida pela envolvente dos edifícios; controlo das infiltrações de ar; recurso a tecnologias solares passivas e activas; melhoria da eficiência dos sistemas e equipamentos energéticos (Paiva, 2000). No estudo realizado para a execução de uma intervenção de reabilitação é, também, aconselhado que sejam verificadas as possibilidades de aplicação de sistemas baseados em energias renováveis. (Silva *et al.*, 2012). A reabilitação térmica e energética também possibilita a correcção de manifestações patológicas ocorrentes nos edifícios, como a presença de humidade e a degradação do aspecto.

Quando se analisa um edifício para uma possível reabilitação térmica não se pode ter em conta apenas o seu grau de deterioração, devendo-se considerar igualmente as características actuais do edifício (como a existência do isolamento das fachadas, coberturas e pavimentos, infiltrações de ar, qualidade dos envidraçados e sistemas) e os comportamentos dos seus habitantes. Por vezes, este último pode ser o elemento chave para compreender a redução do desempenho térmico do edifício (Abreu & Lopes, 2006).

Para as medidas de reabilitação térmica da envolvente dos edifícios, em termos de hierarquização do ponto de vista da análise custo-benefício (eficiência energética), as mais

favoráveis são, em geral, as que incidem nas coberturas, seguidas das que incidem aos pavimentos sobre espaços exteriores e, finalmente, as relativas às paredes exteriores (Anselmo *et al.*, 2004).

#### 2.4.2. Medidas passivas e activas

O bom desempenho deve ser obtido, em primeira instância, através de um projecto passivo eficiente e só depois complementado com medidas activas que supram as necessidades sobrantes do primeiro (Ferreira, 2012). Como medidas passivas têm-se as ligadas à construção bioclimática, os sistemas solares passivos e os de arrefecimento passivos e, ainda, a utilização de materiais de mudança de fase.

O sistema solar passivo utiliza a energia do sol, de forma a fornecer, total ou parcialmente, o calor necessário para o aquecimento. Sistema que tira partido dos elementos construtivos dos edifícios, como as janelas, paredes, pavimento e cobertura, com o intuito de desempenharem funções de recolha, de armazenamento, de utilização e de distribuição da energia solar (Lanham *et al.*, 2004).

Os materiais de mudança de fase (PCM – *Phase Change Material*) tem a capacidade de armazenar calor quando a temperatura do meio aumenta, e de o libertar quando a temperatura do meio diminui. Aumentando a capacidade de armazenamento de energia do edifício leva à diminuição das variações da temperatura do ar interior, logo a temperatura aproxima-se da temperatura de conforto por muito tempo, resultando num ambiente de conforto para o ser-humano (Rostamizadeh *et al.*, 2012).

Relativamente às medidas activas, estas são medidas que integram os sistemas mecânicos de aquecimento e arrefecimento do ambiente, tendo como exemplo os seguintes: radiador a água; ventiloconvetor; pavimento, tecto ou parede radiante; caldeira a gás ou a gasóleo, bombas de calor (Lisboa, 2007). Ainda são exemplo os sistemas solares térmicos e os sistemas de micro-produção.

#### 2.4.3. Reabilitação térmica e energética dos elementos da envolvente

De uma forma geral, as estratégias que se devem implementar aos elementos da envolvente dos edifícios são descritas em seguida.

#### 2.4.3.1. Cobertura

Sendo a cobertura o elemento construtivo sujeito às maiores amplitudes térmicas, a introdução de isolamento térmico é considerado uma intervenção de eficiência energética prioritária, tendo em conta as vantagens imediatas em termos da diminuição das necessidades energéticas (Anselmo *et al.*, 2004).

#### 2.4.3.2. Pavimentos

Nos edifícios, as perdas de calor através dos pavimentos poderão atingir 20% das perdas totais, quer sejam pavimentos em contacto com o terreno, sobre espaços de ar ventilados, directamente sobre espaços não úteis ou exteriores (TDCC, 2013). A intervenção ao nível dos pavimentos é, portanto, fundamental quando estes estão em contacto directo com o exterior ou com espaços interiores não-aquecidos.

#### 2.4.3.3. Paredes

Os sistemas de isolamento térmico de fachadas pelo exterior constituem uma óptima solução tanto do ponto de vista energético como do ponto de vista construtivo, sendo reconhecida como solução técnica de alta qualidade. Esta disposição do isolamento apresenta, entre outras vantagens, as seguintes: redução das pontes térmicas; diminuição do risco de condensações; aumento da inércia térmica interior dos edifícios, facto que se traduz na melhoria do conforto térmico de Inverno, por aumento dos ganhos solares úteis, e também de Verão devido à capacidade de regulação da temperatura interior; economia de energia devido à redução das necessidades de aquecimento e de arrefecimento do ambiente interior; diminuição da espessura das paredes exteriores com consequente aumento da área habitável; melhoria da impermeabilidade das paredes; diminuição do gradiente de temperaturas a que são sujeitas as camadas interiores das paredes (Labrincha *et al.*, 2005).

A colocação do isolamento pelo exterior também encontra desvantagens, como a necessidade de compatibilização com as padieiras, peitoris e vãos (Paiva, 2000).

É importante ter a noção do conceito de “ponte térmica”, esta define-se como toda e qualquer zona da envolvente dos edifícios em que a resistência térmica é significativamente alterada em relação à zona corrente. O fenómeno dá-se quando existe uma descontinuidade na geometria da estrutura ou quando existe materiais com elevada

condutibilidade térmica, desta forma o calor do ambiente interior encontra um caminho fácil para se transmitir ao exterior (Corvacho, 1996).

#### 2.4.3.4. Vãos Envidraçados

A reabilitação térmica nos vãos envidraçados engloba por um lado, o reforço do isolamento térmico, a redução das infiltrações de ar não-controladas e a melhoria da ventilação natural, e por outro, o reforço do aumento da captação de ganhos solares no Inverno e o reforço da protecção da radiação solar durante o Verão através da instalação de dispositivos adequados de sombreamento. Desta forma contribui-se para a redução das necessidades de consumo de energia, assim como para a melhoria das condições de conforto e de qualidade do ar no interior dos edifícios (Anselmo *et al.*, 2004).

As caixilharias desempenham um papel chave na dissipação do calor, nas opções de conservação e dependendo do seu estado de degradação, algumas das soluções que se podem aplicar são: manter os caixilhos existentes, introdução de uma segunda caixilharia pelo interior ou substituir a caixilharia existente por uma nova. É importante realçar a necessidade de um estudo diagnóstico para que as decisões tomadas e as intervenções de reabilitação sejam correctas e eficazes (Lopes, 2006).

Existem caixilharias com corte térmico, estas são as que apresentam melhores propriedades térmicas, sendo constituídas por dois perfis independentes, unidos por perfis de poliamida, garantindo que se consegue o isolamento térmico entre o elemento do exterior e o elemento do interior, independentemente do material do caixilho (madeira, alumínio ou PVC) (Jardim, 2009).

#### 2.4.3.5. Sistemas de ventilação com recuperação de energia

Os sistemas de ventilação com recuperação de energia são uma solução para garantir um elevado desempenho energético global do edifício e alcançar os requisitos em termos de qualidade do ar interior. Nesses sistemas, a energia do ar interior extraído do edifício é utilizado para pré-aquecer (no Inverno) ou pré-arrefecer (no Verão) o fluxo de ar vindo do ambiente exterior, não misturando os fluxos de ar (Gendebien *et al.*, 2013).

Como o sistema exige a passagem de condutas, nos edifícios antigos esta deve ser feita de uma forma inteligente, isto é, podendo o sótão servir de zona técnica ao sistema.



Este processo implica um investimento inicial, compensado ao fim de algum tempo pois é um sistema com grandes vantagens em termos de qualidade do ar interior e conforto térmico (Cancela, 2013).

#### 2.4.4. Reabilitação térmica e energética de edifícios em adobe

Para os edifícios existentes em Portugal, nomeadamente na região de Aveiro, que apresenta climas mais amenos devido à preponderância da influência estabilizadora marítima, é importante dota-los de níveis adequados de isolamento e os enviaçados deverão ter sombreamentos eficazes (Gonçalves, 2004).

No entanto, no que concerne a edifícios de adobe, ao nível da reabilitação deve ter-se o cuidado de aproveitar a sua capacidade de inércia térmica, evitando a colocação de material isolante pelo interior das paredes. Ao coloca-lo pelo exterior promove-se uma inércia térmica forte, que deve ser bem estudada, pois em certos casos uma inércia forte pode ser prejudicial. Para além de que a colocação do isolamento pelo exterior pode causar problemas do ponto de vista arquitectónico.

Devem, ainda, ser aplicados todos os esforços razoáveis para se reterem os pormenores originais dos edifícios em adobe, como as janelas, portas e pavimentos, adoptando soluções com o mínimo de intrusão (TPS, 2015).

Na reabilitação de edifícios de adobe também é necessário garantir a utilização de argamassas de propriedades semelhantes à base de terra e cal, com o mínimo de cimento, diminuindo o risco de fissuras e mantendo a permeabilidade ao vapor de água (Jalali & Eires 2008).

A reabilitação de edifícios permite uma redução dos desperdícios decorrentes das demolições e o respectivo processo oneroso do seu tratamento e reduzida reciclagem com consequências ambientais, mas também melhorar as condições de qualidade de vida e de maior eficiência energética do parque habitacional antigo, considerando ainda a grande vantagem que possui a construção de adobe neste âmbito.

É de salientar que, em fase de utilização da construção esta apresenta menor consumo de energia pelas características do adobe, se existirem cuidados ao nível do reforço de isolamento térmico ao nível das coberturas e vãos (Tavares *et al.*, 2011).



## Capítulo 3

---

CARATERIZAÇÃO DO CASO DE ESTUDO

### **3 CARACTERIZAÇÃO DO CASO DE ESTUDO**

#### 3.1. Considerações gerais

#### 3.2. Localização do edifício

##### 3.2.1. Localização geográfica

##### 3.2.2. Clima

#### 3.3. Descrição do edifício

##### 3.3.1. Configuração do edifício

##### 3.3.2. Soluções construtivas

#### 3.4. Monitorização

### **3. CARACTERIZAÇÃO DO CASO DE ESTUDO**

No presente capítulo é apresentado o caso de estudo indicando a sua localização e tipo de clima a que está sujeito, as suas características de configuração, geométricas e construtivas, assim como o procedimento levado a cabo para a monitorização termohigrotérmica do edifício.

#### **3.1. Considerações gerais**

Na criação do modelo apenas foi considerada a casa original constituída por paredes exteriores de adobe, paredes interiores de tabique, pavimento e cobertura em estrutura de madeira pois o presente estudo foca o comportamento térmico e energético de edifícios construídos em adobe. Assim, foram desprezadas todas as construções anexas posteriores, nomeadamente a marquise e a instalação sanitária, ambas situadas no primeiro andar e orientadas a noroeste, sendo adjacentes à cozinha do edifício original.

As plantas de arquitectura e a informação relativa à monitorização presentes neste capítulo foram consultadas na dissertação de mestrado realizada pela Diana Cancela que abordou e estudou o comportamento higrotérmico através da monitorização da casa em estudo (Cancela, 2013).

#### **3.2. Localização do edifício**

##### **3.2.1. Localização geográfica**

O edifício em estudo localiza-se em Ílhavo, cidade pertencente ao distrito de Aveiro. A sua localização geográfica é identificada pelas seguintes coordenadas:

- Latitude de 40° 35' 50.94'' N;
- Longitude de 8° 40' 12.28'' W
- Altitude de 12 metros.

Como é possível observar na Figura 7 b) o edifício é rodeado por vegetação, composta maioritariamente por árvores, sendo também rodeado por alguns edifícios a um raio de sensivelmente 24 metros. A fachada principal encontra-se orientada a Sudeste.

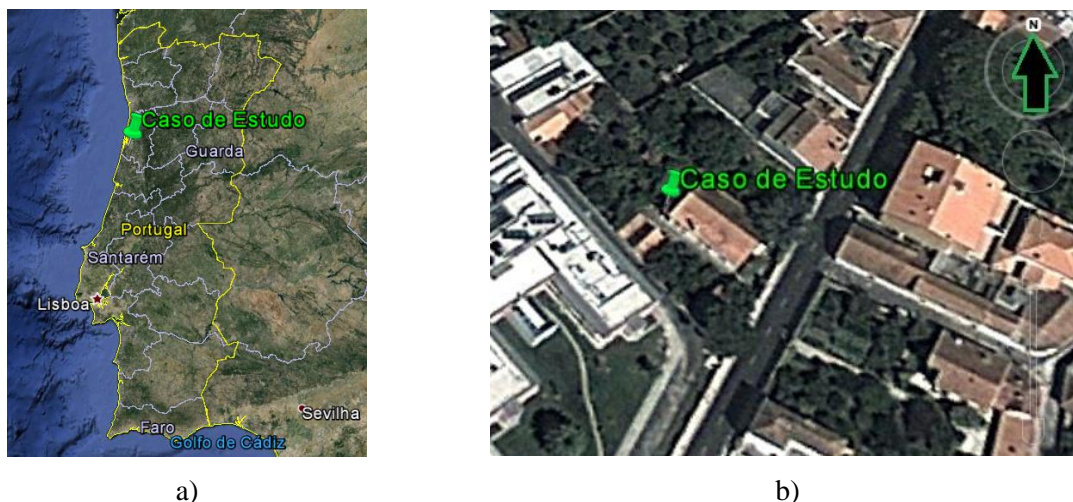


Figura 7 - a) Localização do edifício em relação a Portugal; b) Localização do edifício em relação ao que o rodeia (Fonte: GoogleEarth).

### 3.2.2. Clima

Segundo a classificação de Koppen, o clima de Portugal Continental divide-se em dois tipos, consoante a região: um de clima temperado com Inverno chuvoso e Verão seco e quente (Csa); outro de clima temperado com Inverno chuvoso e Verão seco e pouco quente (Csb). Ílhavo insere-se na região caracterizada pelo clima Csb (IPMA, 2013).

Segundo o REH (DL n.º118/2013) o zonamento climático do País baseado na Nomenclatura das Unidades Territoriais para Fins Estatísticos (NUTS) de nível III insere Ílhavo na região do Baixo Vouga. Para além desta categorização o regulamento divide Portugal em três zonas climáticas de Inverno e três zonas climáticas de Verão para aplicação de requisitos de qualidade térmica da envolvente. Os critérios para a determinação da zona climática de Inverno apresentam-se na Tabela 4.

Tabela 4 - Critérios para a determinação da zona climática de Inverno.

Critério	$GD \leq 1300$	$1300 < GD \leq 1800$	$GD > 1800$
Zona Climática	I1	I2	I3

O número de graus-dias, na base de 18°C, correspondente à estação convencional de aquecimento para o local em estudo é determinado pela seguinte equação:

$$GD = GD_{REF} + a \times (z - z_{REF}) \quad (2)$$

Em que, os valores para a região do Baixo Vouga são:

$GD_{REF}$  – Número de graus-dias de referência é igual a 1337°C;

$a$  – Factor de correcção é igual a 1100 °C/km;

$Z_{REF}$  – Altitude de referência é igual a 50m.

Desta forma, para uma altitude de 12 metros, o número de graus-dias resultante para o local em estudo é de 1295.2°C, enquadrando-se na zona climática de Inverno II. Para a zona climática de Verão, os critérios para a sua determinação encontram-se na Tabela 5.

Tabela 5 - Critérios para a determinação da zona climática de Verão.

Critério	$\theta_{ext,v} \leq 20^{\circ}\text{C}$	$20^{\circ}\text{C} < \theta_{ext,v} \leq 22^{\circ}\text{C}$	$\theta_{ext,v} > 22^{\circ}\text{C}$
Zona Climática	V1	V2	V3

A temperatura exterior média correspondente à estação convencional de arrefecimento para o local em estudo é determinado pela seguinte equação:

$$\theta_{ext,v} = \theta_{ext,v_{REF}} + a \times (z - z_{REF}) \quad (3)$$

Em que, os valores para a região do Baixo Vouga são:

$\theta_{ext,v_{REF}}$  – Temperatura exterior média de referência é igual a 20.6°C;

$a$  – Factor de correcção é igual a -2°C/km;

$Z_{REF}$  – Altitude de referência é igual a 50m.

Assim, para uma altitude de 12 metros, a temperatura exterior média resultante para o local em estudo é de 20.68°C, enquadra-se na zona climática de Verão V2.

A duração da estação de aquecimento de referência para esta região é de 6.3 meses.

### **3.3. Descrição do edifício**

#### **3.3.1. Configuração do edifício**

Construído no final do século XIX, o edifício em estudo é de forma regular (paralelepípedica) e constituído por três pisos: o rés-do-chão (r/c), o primeiro andar e o sótão. A grande vantagem de uma geometria de forma regular é a redução dos problemas associados às pontes térmicas. Este edifício é representativo dos edifícios existentes na região (Ílhavo) construídos em adobe, no século XIX.

A configuração da compartimentação de cada piso é representada nas plantas que se apresentam na Figura 8. A Figura 8 b) corresponde à planta do r/c, piso que tem como principal função a arrumação, no entanto também existe uma instalação sanitária. A Figura 8 c) corresponde à planta do primeiro andar, piso que contém os quartos, salas e uma cozinha, assim como a extensão que consiste na marquise e instalação sanitária. Na sala que é possível visualizar com maior área, existe uma lareira. Por último, a Figura 8 d) diz respeito à planta do sótão que contém como compartimentos habitáveis o escritório e o salão, os restantes servem de arrumos e encontram-se na parte do desvão ventilado da cobertura. A planta da cobertura e os alçados da casa encontram-se no Anexo A. Os compartimentos considerados espaços não úteis são os que não são habitáveis, ou seja, os arrumos existentes no r/c e no desvão da cobertura.



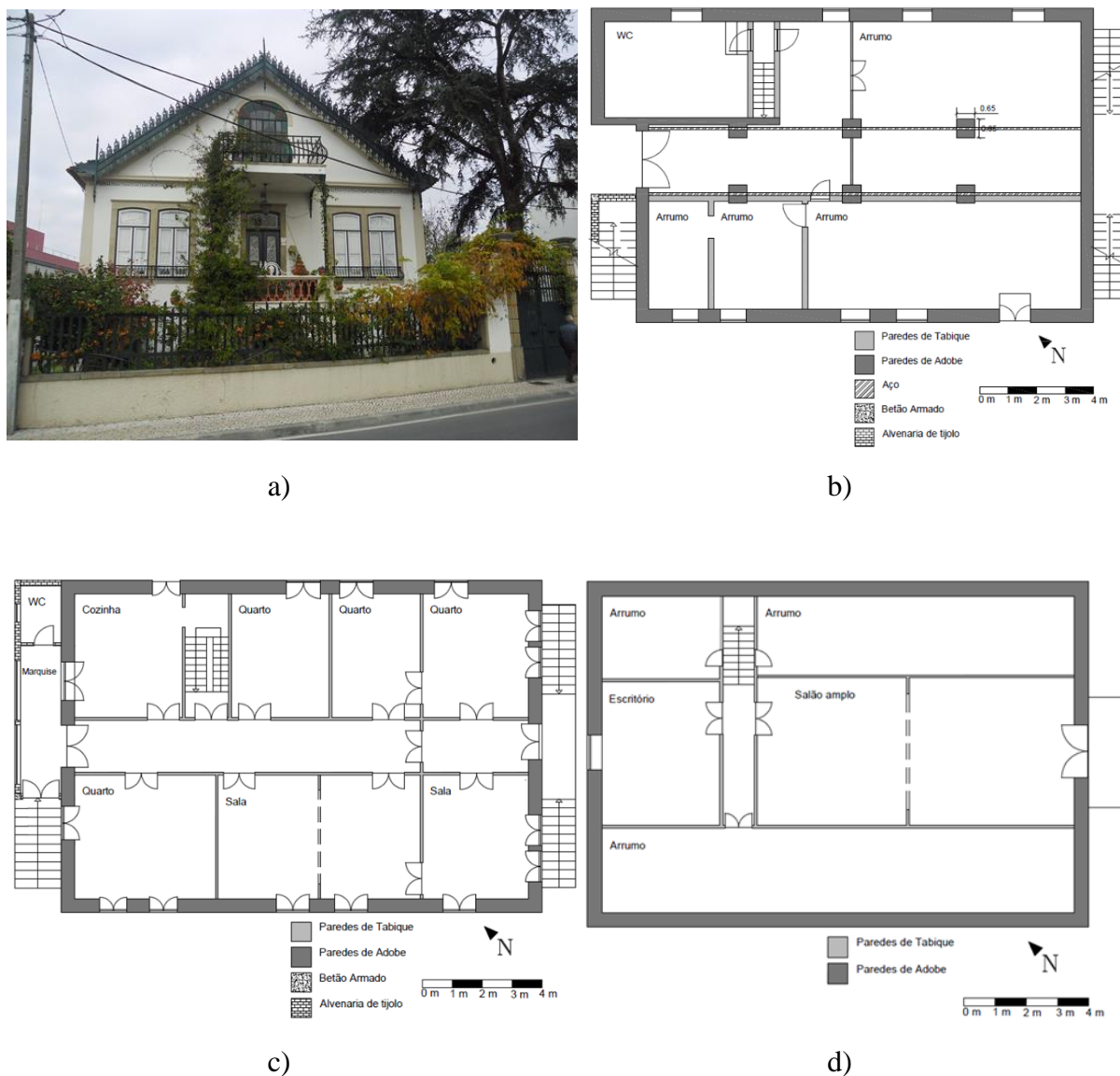


Figura 8 - Configuração do edifício. a) Fachada principal; b) Planta do r/c; c) Planta do 1º andar; d) Planta do sótão.

### 3.3.2. Soluções construtivas

Nesta secção apenas serão caracterizadas as soluções construtivas introduzidas no modelo, ou seja, as relativas à casa original, consideração justificada na secção das considerações gerais do presente capítulo. Juntamente com a descrição das soluções, na Tabela 6 apresentam-se os valores do coeficiente de transmissão térmica de cada solução

da envolvente externa que foram retirados do modelo numérico final, que será descrito no próximo capítulo.

Tabela 6 - Descrição das soluções construtivas.

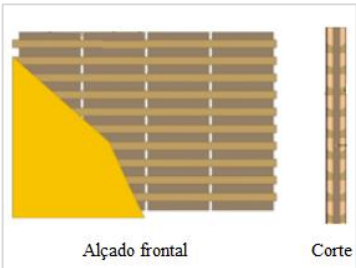

Solução construtiva	Descrição da solução construtiva
<p>Paredes exteriores:</p> 	<p>Paredes de alvenaria de adobe com 41 cm de espessura, rebocadas em ambas as faces com argamassa de cal aérea com cerca de 2.5 cm de espessura de cada lado.</p> <p><math>U = 1.71 \text{ W/m}^2\text{°C}</math></p>
<p>Paredes interiores no r/c e 1º andar:</p>  <p>Fonte: (Pinto <i>et al.</i>, 2011)</p>	<p>Paredes em tabique com 7 cm de espessura, pintadas em ambas as faces com tinta de cor branca.</p>
<p>Paredes interiores no sótão:</p> 	<p>Parede divisória em madeira com 2.5 cm de espessura, a cor natural da madeira.</p>

Tabela 6 – Continuação da descrição das soluções construtivas.




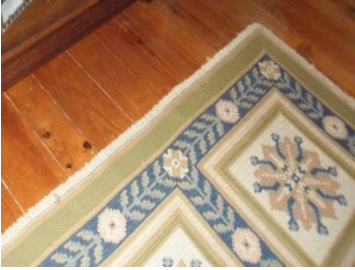
Solução construtiva	Descrição da solução construtiva
<p>Pavimento em contacto com o solo:</p> <p>a) Revestimento em cacos de gazete</p>  <p>b) Revestimento em mosaico cerâmico</p> 	<p>Pavimento constituído por massame de terra, betonilha, argamassa de assentamento e apresentando um revestimento em cacos de gazete ou mosaico cerâmico (instalação sanitária e arrumos).</p> $U_{\text{térreo}} = 2.32 \text{ W/m}^2\text{°C}$ <p>Nota: relativamente a este pavimento só se conhece o tipo de revestimento, no entanto, considerou-se a solução construtiva típica para um pavimento em contacto com o solo com revestimento cerâmico.</p>
<p>Pavimentos elevados:</p> <p>a) Estrutura de madeira</p>  <p>b) Pavimento revestido com soalho</p> 	<p>Pavimento em estrutura de madeira com vigas espaçadas de forma constante com aproximadamente 46 cm, estando apoiadas nas paredes resistentes de adobe.</p> <p>Apenas no compartimento da cozinha existe pavimento revestido com mosaico cerâmico, nos restantes compartimentos o pavimento é revestido com soalho de madeira com 2.5 cm. A parte inferior do pavimento, ou seja, o tecto é executado com um forro de madeira, com 1.5 cm, pintado de branco.</p>

Tabela 6 – Continuação da descrição das soluções construtivas.





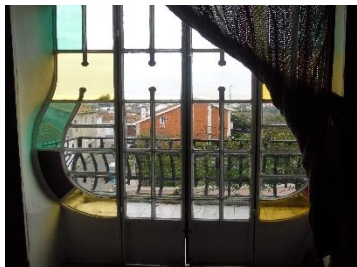

Solução construtiva	Descrição da solução construtiva
<p>Cobertura:</p> <p>a) Pormenor com o isolamento</p> 	<p>Cobertura constituída por asnas e madres e por um ripado que suporta o isolamento em poliestireno extrudido (5 cm) e por um outro ripado em que assenta o revestimento em telhas cerâmicas do tipo “marselha”.</p> <p><math>U = 0.63 \text{ W/m}^2\text{°C}</math></p>
<p>Envidraçados:</p> <p>a) Envidraçado no r/c</p>  <p>b) Envidraçado no 1º andar</p> 	<p>Os envidraçados no r/c têm dimensão reduzida e são formados por vidro simples (4mm) e caixilharia de madeira lacada. Algumas janelas são fixas, outras são projectantes.</p> <p>Os envidraçados no 1º andar são formados por vidro simples (4mm) e também caixilharia de madeira. Estes consistem numa janela de abrir de eixo vertical que abre para dentro, a bandeira da janela possui um só vidro, igualmente simples de 4mm de espessura. As portadas são também em madeira com duas ou três folhas, colocadas pelo interior.</p> <p><math>U = 5.1 \text{ W/m}^2\text{°C}</math>, (Pina dos Santos <i>et al.</i>, 2006)</p>

Tabela 6 – Continuação da descrição das soluções construtivas.

Solução construtiva	Descrição da solução construtiva
<p>Portas exteriores:</p> <p>a) Porta exterior de madeira</p>  <p>b) Porta exterior metálica</p> 	<p>A porta exterior do 1º andar que se encontra na fachada principal (SE) e a do sótão que se encontra na fachada orientada a NW são em madeira e têm um postigo de vidro, simples com 4mm de espessura, que garante iluminação e ventilação.</p> <p>A porta exterior do sótão que se encontra na fachada principal (SE) é metálica e possui alguns vidros de diferentes cores, como se observa na figura b).</p> <p><math>U_{porta\ de\ madeira} = 3.09\ W/m^2{}^{\circ}C</math></p> <p><math>U_{porta\ metálica} = 6.66\ W/m^2{}^{\circ}C</math></p>
<p>Portas interiores:</p> 	<p>Portas em madeira maciça lacada de duas folhas com relevos.</p>

### 3.4. Monitorização

Os dados da temperatura interior recolhidos na monitorização *in situ* em que o presente trabalho se baseia pertencem à dissertação de mestrado realizada por Diana Cancela que analisou o comportamento higrotérmico através da monitorização da casa em estudo (Cancela, 2013).

Para a recolha dos dados foram utilizados termohidrógrafos da marca Testo, modelo 174H. Este sistema foi escolhido porque apresenta uma boa precisão ( $\pm 0,5$  °C nas medidas de temperatura e  $\pm 0,03\%$  nas medidas de humidade relativa), tendo também boa capacidade de armazenamento de dados: cerca de 12000 medições considerando medições de 10 em 10 minutos. O local em que se mantiveram durante o período de monitorização é ilustrado na Figura 9 que contém as plantas de cada piso.

Atentando a Figura 9 que contém a localização dos sensores através das plantas e observando da esquerda para a direita, vê-se que no último piso o sensor permaneceu na zona central do salão, enquanto no piso térreo permaneceu no corredor, ligeiramente ao centro, e no exterior foi colocado junto a uma janela orientada a nordeste. Por último, o sensor que registou a temperatura e humidade relativa do primeiro andar esteve em dois locais distintos, manteve-se no corredor durante a estação de Verão e na sala de estar durante a estação de Inverno.

Segundo a Diana Cancela, este último sensor foi mudado do corredor (local que a habitante ventilava) para a sala, porque com a descida das temperaturas na estação de aquecimento, é utilizada uma lareira, existente nesta divisão. Desta forma, os dados recolhidos consideram-se mais fidedignos para uma posterior validação de um modelo numérico por ser conhecida a fonte de calor existente naquele período do ano e por este compartimento não estar sujeito à ventilação proporcionada pela habitante.

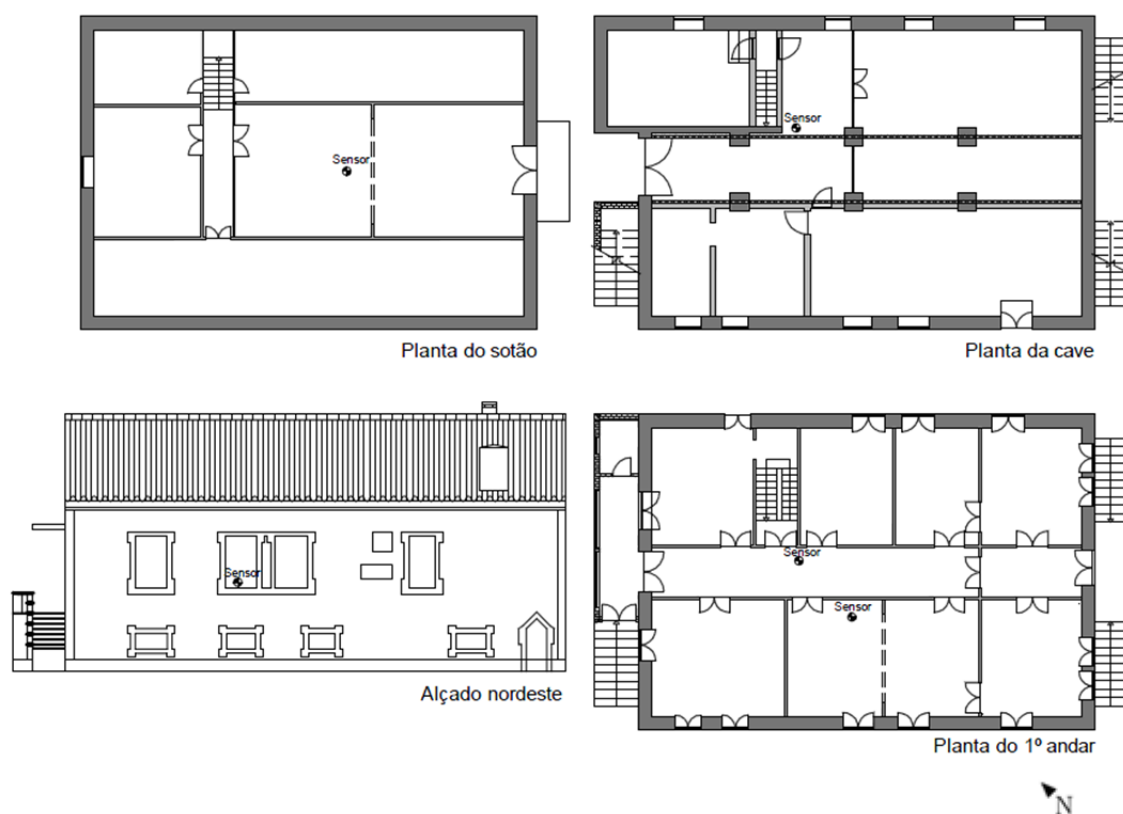


Figura 9 - Localização dos sensores na casa em estudo.

De modo a permitir uma breve análise dos resultados de temperatura e humidade relativa obtidos através da monitorização apresentam-se de seguida os gráficos de temperatura e humidade relativa com estes dados. Para o período de Inverno, os resultados encontram-se na Figura 10 e 11.



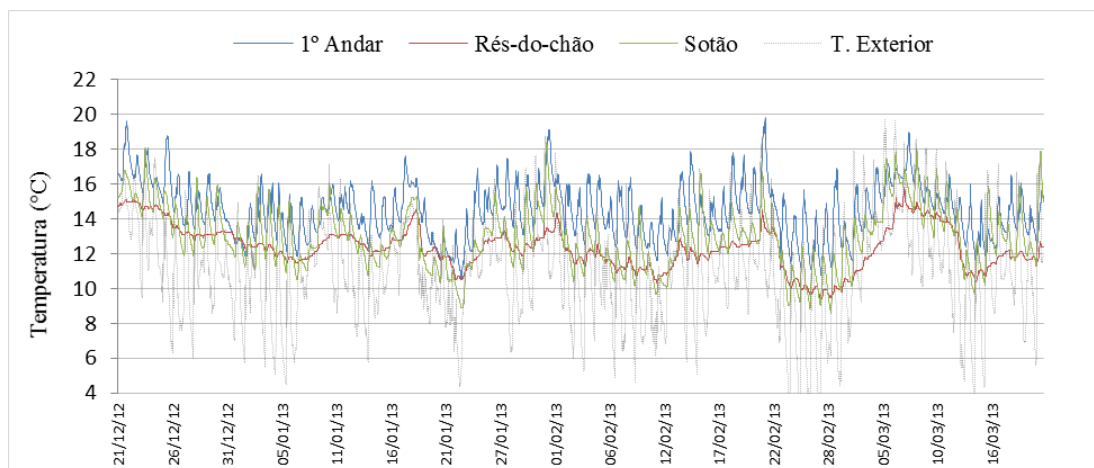


Figura 10 - Temperatura registada pelos sensores no período da estação de aquecimento (21 de Dezembro a 20 de Março de 2013).

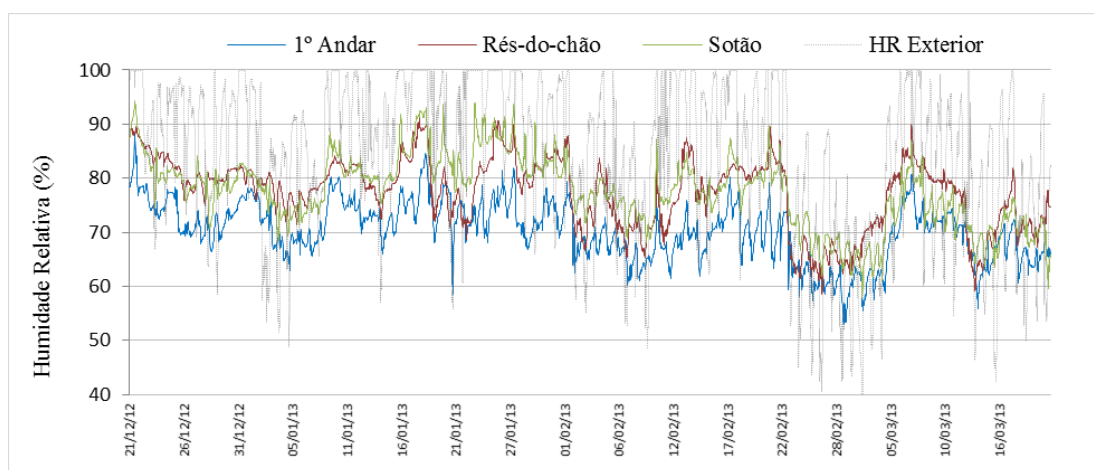


Figura 11 - Humidade relativa registada pelos sensores no período da estação de aquecimento (21 de Dezembro a 20 de Março de 2013).

Os resultados relativos ao período de Verão são exibidos na Figura 12, que contém os registos de temperatura, e na Figura 13, que contém os registos de humidade relativa.



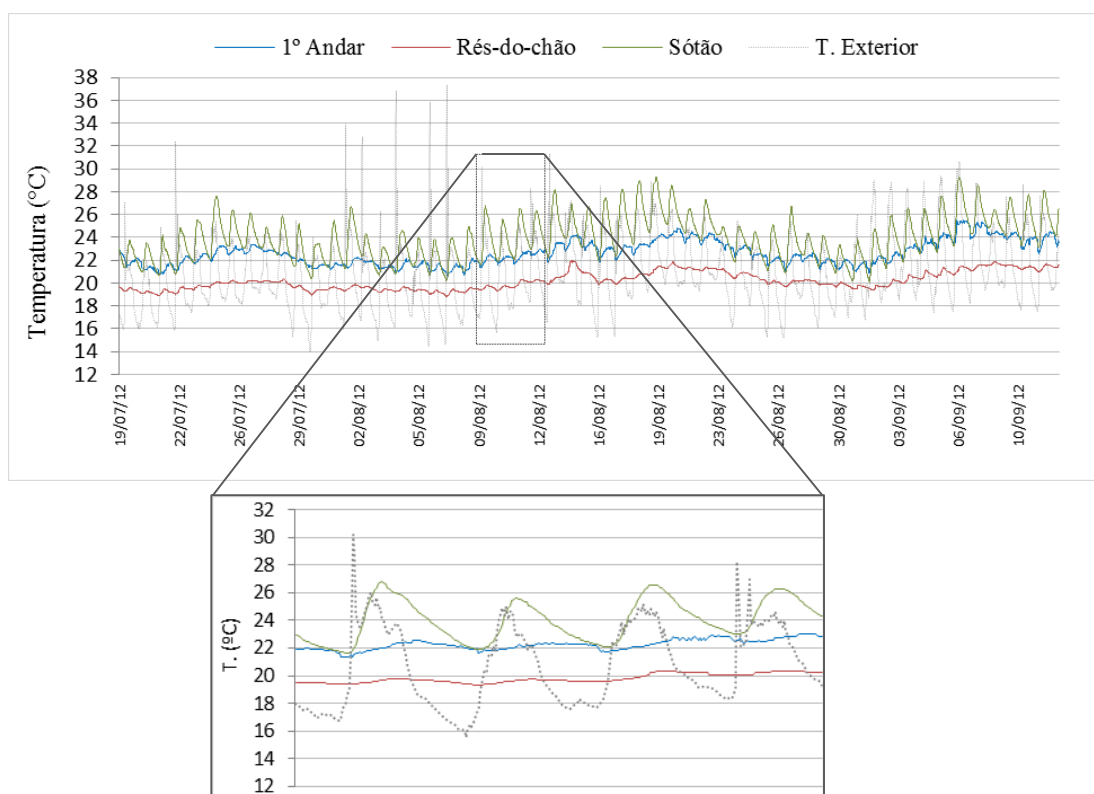


Figura 12 - Temperatura registada pelos sensores no período da estação de arrefecimento (19 de Julho a 12 de Setembro de 2012).

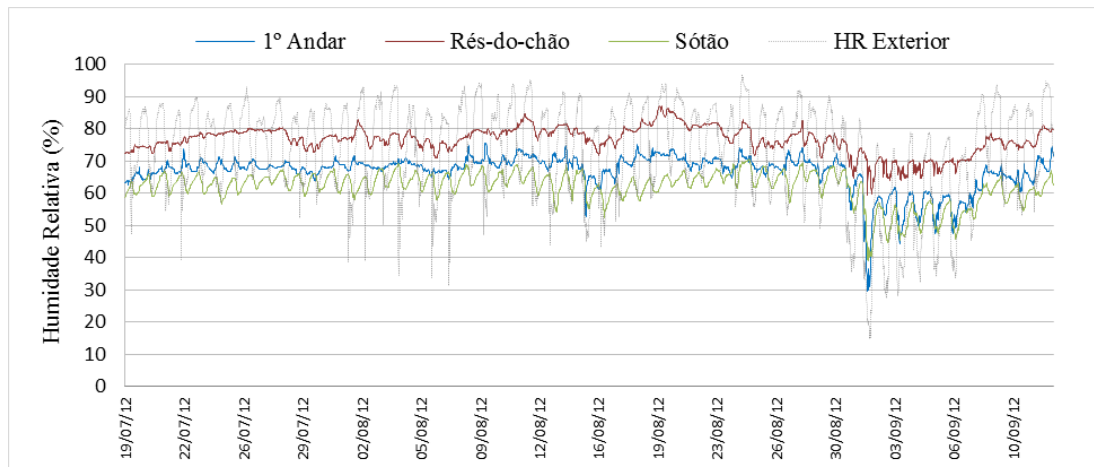


Figura 13 - Humidade relativa registada pelos sensores no período da estação de arrefecimento (19 de Julho a 12 de Setembro de 2012).

A partir dos gráficos é perceptível um melhor comportamento térmico do edifício no período de Verão, observando-se nitidamente a atenuação da amplitude térmica e um ligeiro atraso do pico máximo de temperatura atingido em relação ao pico de temperatura exterior (ver pormenor na Figura 12). Os compartimentos que melhor evidenciam este

comportamento da curva de temperatura são os existentes na cave e no 1º andar, apresentando, conseqüentemente, amplitudes térmicas diárias mais reduzidas.

No que respeita à humidade relativa, verifica-se uma grande variabilidade dos valores para a estação de aquecimento, sendo registados valores entre cerca de 55% a 95%. O compartimento pertencente ao 1º andar é o que apresenta os valores mais baixos. Na estação de arrefecimento registam-se valores entre 40% e 85%. O r/c é o espaço que apresenta os maiores valores de humidade relativa, enquanto nos espaços habitáveis, 1º andar e sótão, a humidade relativa ronda, em média, 65%, valor aceitável.

O intervalo de 40 a 60% de humidade relativa é o mais indicado para a saúde humana. As habitações com valores de humidade acima de 60% ou abaixo de 40% propiciam o aparecimento de doenças do foro respiratório (Torgal *et al.*, 2009c). Desta forma, constata-se que em certos períodos de tempo o edifício não garante bons níveis de humidade relativa.

# Capítulo 4

---

MODELO NUMÉRICO

## **4 MODELO NUMÉRICO**

### 4.1 Considerações gerais

### 4.2 Construção do modelo geométrico

#### 4.2.1 Zonas térmicas

#### 4.2.2 Vãos – portas e janelas

#### 4.2.3 Sombreamento

#### 4.2.4 Áreas e volumes do edifício

### 4.3 Dados climáticos

#### 4.3.1 Distribuição solar

### 4.4 Características dos materiais

#### 4.4.1 Elementos Opacos

#### 4.4.2 Envidraçados e dispositivo de sombreamento

### 4.5 Ganhos internos

### 4.6 Sistemas de climatização

### 4.7 Sistemas de ventilação

### 4.8 Mobiliário

### 4.9 Padrões de utilização do edifício

### 4.10 Validação do modelo

#### 4.10.1 Validação para a estação de aquecimento

#### 4.10.2 Validação para a estação de arrefecimento

### 4.11 Síntese

## 4. MODELO NUMÉRICO

No presente capítulo é descrito o procedimento e todas as considerações adoptadas na criação do modelo numérico. O primeiro passo foi a construção da sua geometria, seguido da construção do ficheiro climático, caracterização dos materiais, quantificação dos ganhos internos, sistemas de climatização, sistemas de ventilação, e por fim, a definição dos padrões de utilização do edifício.

O capítulo encerra com uma secção que contém a descrição da fase da validação do modelo, em que se apresentam os gráficos resultantes, de temperatura interior.

### 4.1. Considerações gerais

A simulação numérica constitui um processo complexo e demorado pois só é possível através da criação de um modelo detalhado e nem sempre é fácil encontrar dados rigorosos de entrada, relativos às propriedades dos materiais e condições de operação dos edifícios.

### 4.2. Construção do modelo geométrico

O programa *EnergyPlus* tem como base um sistema de coordenadas para a criação da geometria do modelo, tornando a introdução desta informação complexa e susceptível a erros. Assim, de modo a facilitar esta tarefa, recorreu-se a uma ferramenta de interligação, o *plug-in OpenStudio*, entre o programa *EnergyPlus* e um programa “*user friendly*”, isto é, um programa amigável no sentido de ser mais lógica e imediata a introdução da informação. O programa dito “*user friendly*” em que primeiro é definida a geometria do modelo, em três dimensões (3D) é o *SketchUp*, sendo posteriormente possível importar esta informação para o programa *EnergyPlus*, sob a forma de coordenadas.

É de salientar que o programa *SketchUp* não confere espessura aos elementos construtivos tendo sido necessário criar uma linha de referência, para desenhar a geometria do edifício, por forma a minimizar o erro relativo à área útil. Esta linha é definida pela linha correspondente à face interior das paredes exteriores e à linha central das paredes interiores. A espessura das camadas dos elementos construtivos é atribuída aquando da

definição das suas características no programa *EnergyPlus*, que serão apresentadas na secção 4.4.

As Figuras 14 a) e b) ilustram a geometria da envolvente exterior do modelo criado. É de salientar que esta é representativa do modelo para a estação de arrefecimento. No modelo para a estação de aquecimento já não existe vegetação, por ser constituída por árvores de folha caduca. A Figura 14 a) contém a fachada principal orientada a SE e a orientada a SW, enquanto a Figura 14 b) contém a fachada orientada a NW e a NE. As diferentes cores visíveis representam o tipo de superfície e o seu significado encontra-se explicado de seguida:

- Amarelo - superfícies expostas à acção do vento e radiação solar, ou seja, paredes da envolvente exterior;
- Vermelho – cobertura;
- Cinzento-escuro – superfícies em contacto com o solo;
- Castanho – portas;
- Azul – janelas;
- Roxo – superfícies de sombreamento;
- Cinzento claro – a superfície do pavimento com a função de pavimento;
- Rosa claro – a superfície do pavimento com a função de tecto.

Nas Figuras 15 a) e b) é visível a geometria interior do modelo, com um código de cores distinto do anterior, que surge quando visualizamos o modelo numa perspectiva de condições de vizinhança. O significado das cores adoptadas pelas superfícies é o seguinte:

- Amarelo claro – elemento construtivo em contacto com o solo;
- Azul – elemento construtivo em contacto com o exterior;
- Verde – elemento construtivo no interior do edifício que define uma zona térmica;
- Rosa – elemento construtivo de compartimentação no interior do edifício mas dentro de uma zona térmica.

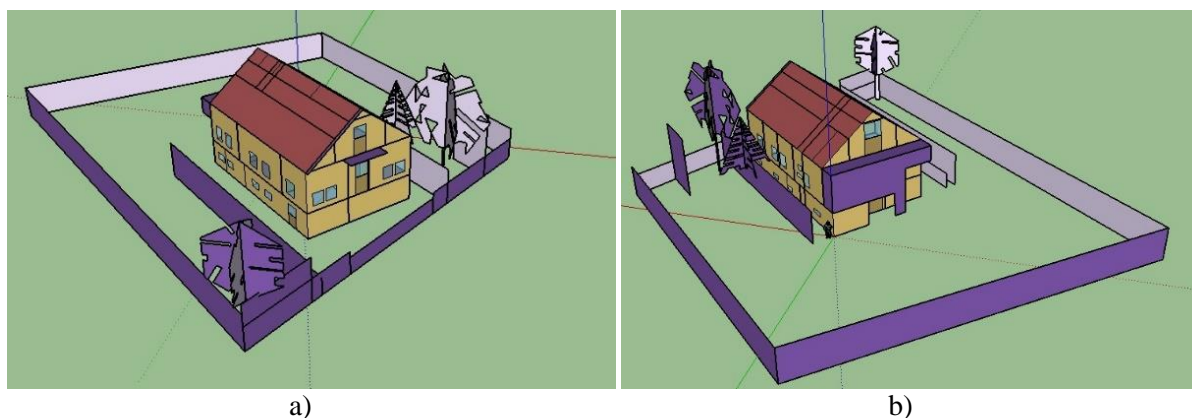


Figura 14 - Geometria exterior do modelo. a) Fachadas orientadas a SE e SW; b) Fachadas orientadas a NW e NE.

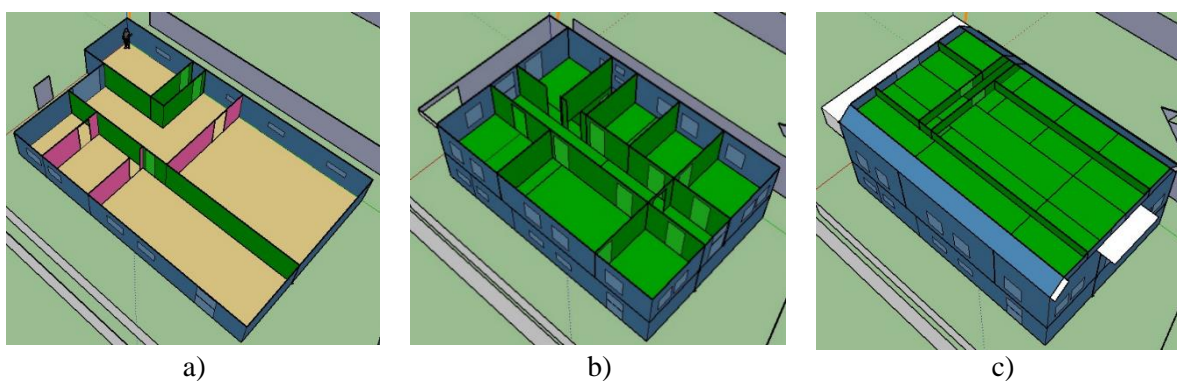


Figura 15 - Geometria interior/compartimentação. a) Compartimentação do r/c; b) Compartimentação do 1º andar; c) Compartimentação do sótão.

#### 4.2.1. Zonas térmicas

É considerado “zona térmica” todo o espaço ou conjunto de espaços que constitui características similares em termos de perfil de utilização, iluminação e equipamentos, ventilação mecânica e sistema de climatização.

O programa assume que a massa de ar no interior de uma zona térmica se encontra perfeitamente homogeneizada a uma temperatura uniforme. Relativamente às superfícies dos elementos construtivos envolventes das zonas térmicas são consideradas as seguintes simplificações (*EnergyPlus*, 2013a):

- A temperatura superficial das superfícies apresenta um valor uniforme;
- A radiação de onda curta e comprida emitida apresenta um valor uniforme;

- Existe troca de radiação difusa entre as diversas superfícies;
- O fluxo de calor por condução que atravessa os elementos de construção é unidireccional e perpendicular à superfície do elemento.

O modelo é formado por 17 zonas térmicas como se pode ver na Figura 16. No r/c a zona térmica 4 (ZT4) é um espaço constituído por um conjunto de arrumos, é assim considerado, por estes apresentarem os seus envidraçados com igual orientação e com dimensões muito similares, por terem a mesma função, logo o mesmo padrão de utilização. Entre os arrumos existe um elemento de ligação que permite a movimentação do ar, a porta sempre aberta. Com a zona ZT3 sucede-se o mesmo. A zona ZT2 compreende todo o espaço da caixa de escadas e o pequeno corredor existente no sótão pois não existe nenhum elemento construtivo a separa-los. As restantes zonas térmicas são definidas pela compartimentação.

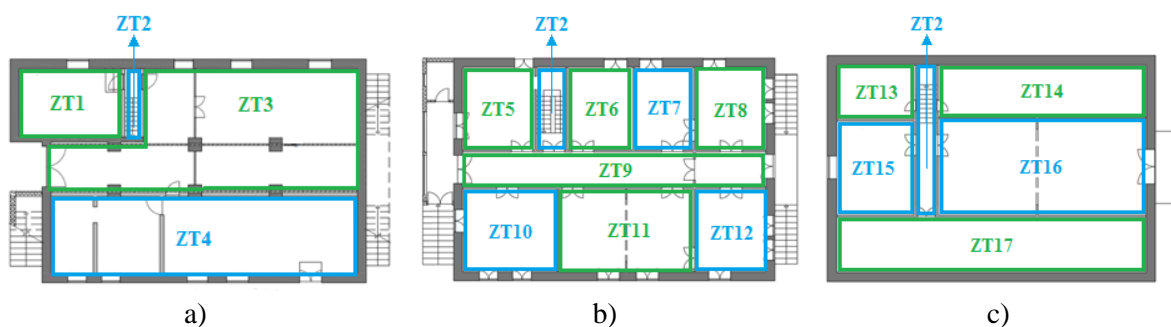


Figura 16 - Identificação das zonas térmicas. a) Planta do r/c; b) Planta do 1º andar; c) Planta do sótão.

#### 4.2.2. Vãos – portas e janelas

Na criação do modelo geométrico foi necessário admitir algumas simplificações. No caso das portas, estas foram inseridas no modelo, no entanto, não foi aplicado qualquer horário de operacionalidade tendo sido considerado permanentemente abertas ou fechadas, conforme indicado pelo ocupante da casa. As portas consideradas permanentemente abertas foram as pertencentes às zonas térmicas ZT2 (apenas a que tem ligação para o corredor do 1º andar e a que tem para o sótão), ZT3, ZT4, ZT5, ZT9 (apenas a interior, a que não tem ligação com o exterior) e à zona ZT10.



Relativamente às janelas, a sua definição no modelo foi simplificada na medida em que não foi especificada detalhadamente a caixilharia, isto é, dimensões do caixilho e quadrícula. Foi apenas introduzido o valor da área do vidro, do coeficiente de transmissão térmico equivalente do vão envidraçado (caixilharia de madeira com vidro simples) e do factor solar do vidro.

É de realçar que no modelo se assumiu as portas exteriores envidraçadas equivalentes a dois rectângulos sobrepostos, o primeiro definido como porta e contendo a área opaca desta, o segundo, colocado acima, definido como vidro e contendo a área envidraçada.

#### 4.2.3. Sombreamento

No programa apenas é possível definir um tipo de dispositivo de sombreamento associado às janelas, neste caso seria cortinas interiores de pano ou portadas. Optou-se pelas portadas pois a sua eficiência é mais significativa na estação de arrefecimento sendo benéfica a sua existência no modelo para a fase da validação. Este tipo de sombreamento só existe no 1º andar, nos restantes pisos existem cortinas de pano ou não existe qualquer dispositivo de sombreamento.

Segundo a única ocupante da casa as portadas que permanecem sempre abertas independentemente da estação do ano são: a pertencente à zona térmica ZT5 e uma das orientadas a SW da zona ZT10. As restantes mantêm-se fechadas na estação de arrefecimento e são abertas na estação de aquecimento de modo a maximizar os ganhos solares.

As características adoptadas para as portadas encontram-se na secção 4.4. respeitante à caracterização dos materiais.

Quanto à vegetação, a sua existência apenas é considerada na estação de arrefecimento pois as árvores circundantes ao edifício são de folha caduca.

#### 4.2.4. Áreas e volumes do edifício

O edifício apresenta uma área total útil de 212.90 m<sup>2</sup>, sendo o volume respectivo a esta área, volume total útil de 709.95 m<sup>3</sup>. A Tabela 7 apresenta a percentagem de área

envidraçada pela orientação de cada fachada. A Tabela 8 apresenta os volumes associados a cada zona térmica habitável e a percentagem de área envidraçada por compartimentação (área de piso do compartimento). Apresentando, também, a verificação imposta pelo Regulamento Geral de Edificação Urbana, o RGEU (DL n.º 38382/51), para as condições de salubridade. Segundo o artigo 71º do regulamento RGEU (DL n.º 38382/51), “os compartimentos das habitações serão sempre iluminados e ventilados por um ou mais vãos praticados nas paredes, em comunicação directa com o exterior e cuja área total não será inferior a um décimo da área do comportamento”.

Tabela 7 - Percentagem de área envidraçada por orientação de fachada.

	NE	SE	SW	NW
Área opaca, $A_o$ (m <sup>2</sup> )	92.23	78.7	88.66	78.7
Área translúcida, $A_t$ (m <sup>2</sup> )	7.82	6.86	10.26	5.36
$A_t/A_o$ (%)	8.47	8.72	11.57	6.81

Tabela 8 - Percentagem de área envidraçada por compartimentação.

Piso	Zona Térmica	Volume (m <sup>3</sup> )	Área de piso, $A_p$ (m <sup>2</sup> )	Área de envidraçado, $A_{env}$ (m <sup>2</sup> )	$A_{env}/A_p$ (%)	$A_{env} > 0.1A_{piso}$
1º Andar	ZT5	47.83	14.92	1.17	7.84	X
	ZT6	46.09	12.95	1.44	11.12	✓
	ZT7	45.2	12.7	1.44	11.34	✓
	ZT8	53.25	14.96	3.62	24.20	✓
	ZT9	114.51	30.56	-	-	-
	ZT10	70.16	18.35	3.78	20.60	✓
	ZT11	94.34	26.5	2.88	10.87	✓
	ZT12	49.31	13.85	3.62	26.14	✓
Sótão	ZT15	47.48	17.09	2.38	13.93	✓
	ZT16	141.78	51.02	1.07	2.10	X

Apenas as zonas térmicas ZT5 (cozinha) e ZT16 (salão do sótão) não verificam a condição mínima para garantia de salubridade. Contudo, tendo em conta que a cozinha apresenta uma abertura para o exterior (chaminé) considera-se que esta também garante as condições mínimas de salubridade.

### 4.3.Dados climáticos

O modelo numérico necessita de informação relativa ao clima característico da região em que se insere, para o efeito foi utilizado um ficheiro climático anual fornecido pelo Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG). Este contém informação dos parâmetros apresentados na Tabela 9, resultantes da média dos valores de um período de medições de 29 anos (entre 1961 e 1990).

No caso da validação do modelo é vantajoso utilizar-se um ficheiro climático com dados climáticos medidos no período de simulação desejado, e não dados referentes a um período representativo como é o caso dos dados contidos no ficheiro fornecido. Como a validação será feita apenas recorrendo à temperatura do ar (interior), considerou-se mais fidedigno a substituição da temperatura exterior pela média das temperaturas de três sensores implantados na localidade de Ílhavo, num raio de 2km, no período de simulação desejado. Os períodos do ano analisados foram: 19 de Julho a 12 de Setembro, representativo da estação de Verão; 21 de Dezembro a 20 de Março, representativo da estação de Inverno.

Como foi explicado na introdução do presente trabalho, os dados dos sensores exteriores provêm da monitorização *in situ* realizada para o desenvolvimento da dissertação de mestrado “Comportamento higrotérmico e monitorização de construções em adobe” da Diana Cancela (Cancela, 2013). Um dos sensores foi colocado na parte exterior da casa em estudo e os restantes foram colocados num raio de 2km, à mesma cota altimétrica, tendo o cuidado de ficarem ao abrigo da radiação solar directa e da pluviosidade.

A proximidade entre o valor da temperatura exterior médio dos sensores com o valor da temperatura exterior cedido pela Estação de Meteorologia do Departamento de Física da Universidade de Aveiro para o mesmo período (período acima referido) valida a utilização destes valores para a validação do modelo.

Na fase da análise paramétrica do comportamento térmico e das estratégias de reabilitação, o ficheiro climático utilizado é o ficheiro integral do LNEG.

Tabela 9 - Parâmetros contidos no ficheiro climático do LNEG.

Temperatura (°C)	Radiação solar – difusa horizontal (W/m <sup>2</sup> )
Humidade Relativa (%)	Radiação solar – global vertical com a orientação N, S, E, W, NE, NW, SE, SW (W/m <sup>2</sup> )
Nebulosidade Total (0 a 10 limpo a coberto)	Radiação IV – celeste descendente (W/m <sup>2</sup> )
Nebulosidade Opaca (0 a 10 limpo a coberto)	Iluminância – global horizontal, difusa horizontal e directa normal (lux)
Radiação solar – global horizontal (W/m <sup>2</sup> )	Luminância zenital (Cd/m <sup>2</sup> )

A Figura 17 apresenta o gráfico da temperatura exterior média diária ao longo do ano, dados provenientes do ficheiro climático, enquanto a Figura 18 apresenta o gráfico da probabilidade cumulativa da temperatura exterior horária, também ao longo do ano.

Através da Figura 17 tem-se a percepção da variação da temperatura ao longo do ano na região de Aveiro e da Figura 18 constata-se que a temperatura mínima atingida nesta região é próxima dos 0°C e que a temperatura máxima atinge os 31.5°C. É de relembrar que estes dados resultam da média dos valores de um período de medições de 29 anos.

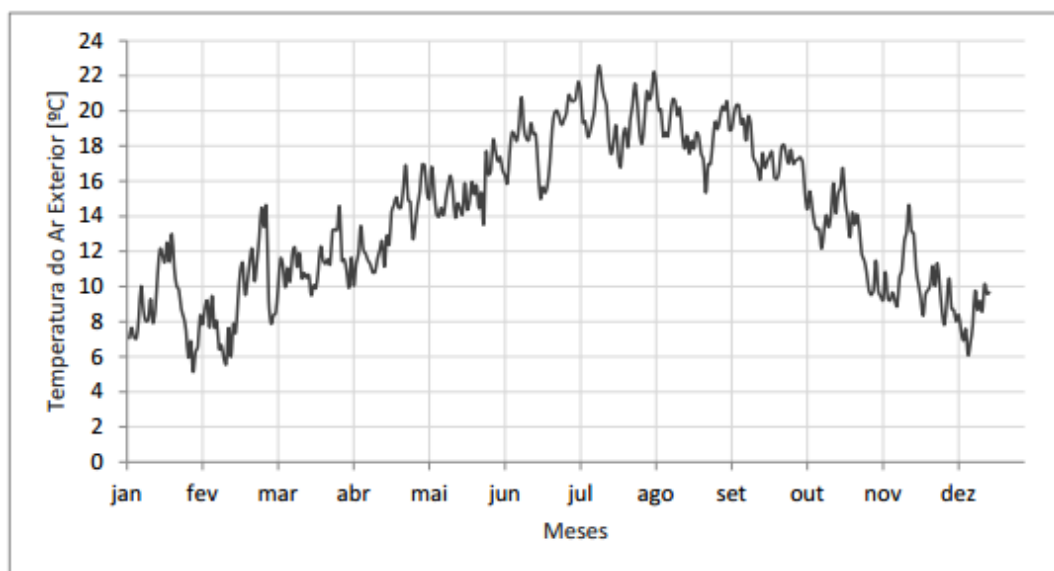


Figura 17 - Média diária da temperatura exterior em Aveiro entre 1961 e 1990.

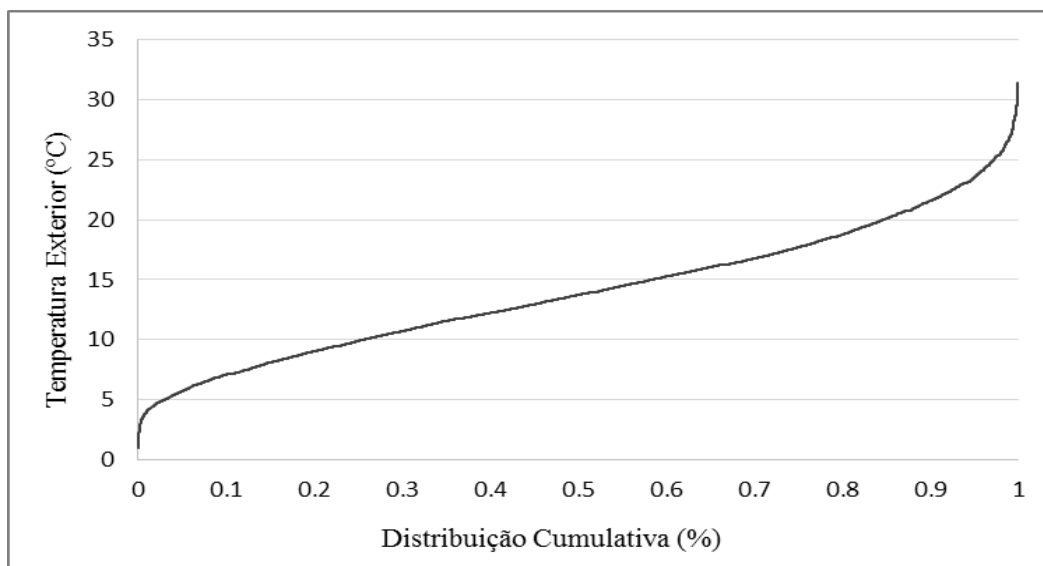


Figura 18 - Probabilidade cumulativa da temperatura exterior em Aveiro.

Na Figura 19 é apresentada a média horária da radiação solar horizontal mensal em Aveiro por metro quadrado. Verifica-se que os períodos de radiação máxima correspondem aos meses de Maio, Junho, Julho e Agosto e que os períodos de radiação mínima correspondem aos meses de Novembro, Dezembro, Janeiro e Fevereiro. Os elevados valores traduzem a necessidade de implementação de dispositivos de sombreamento nos edifícios na região, nos períodos mais quentes.

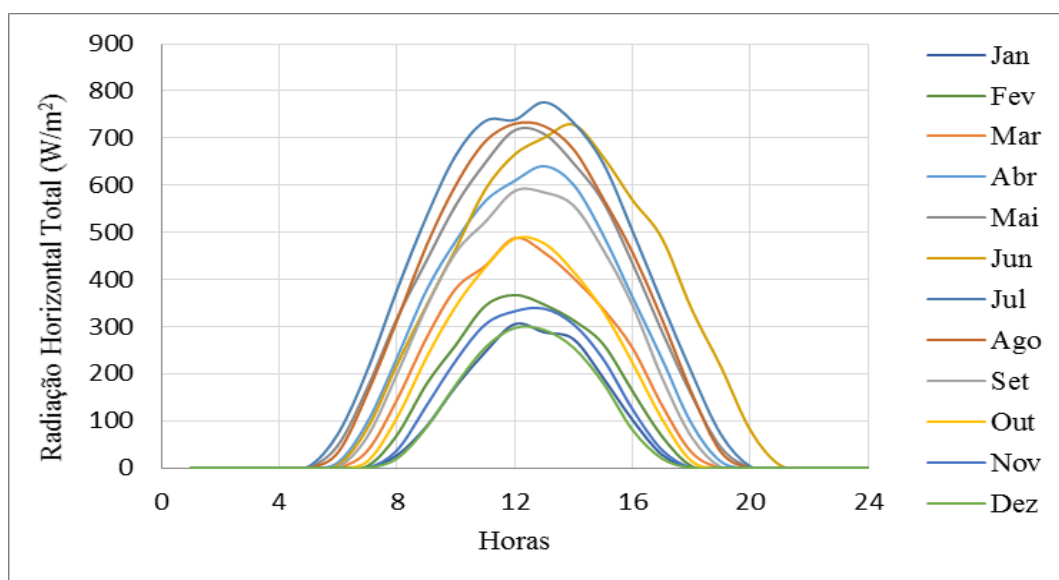


Figura 19 - Média horária da radiação solar horizontal mensal em Aveiro.

#### 4.3.1. Distribuição solar

O programa contém cinco diferentes algoritmos de cálculo para a consideração da energia proveniente da radiação solar: *MinimalShadowing*; *FullExteriorWithReflections*; *FullExterior*; *FullInteriorAndExteriorWithReflections*; *FullInteriorAndExterior*.

O primeiro ignora o sombreamento de elementos exteriores independentes do edifício, como árvores e outros edifícios, e considera que os raios solares que entram na zona térmica são unicamente absorvidos pelo pavimento (chão), consoante o poder de absorção do material. A parte reflectida pelo pavimento é adicionada à radiação difusa que é assumida como sendo uniformemente distribuída pelas restantes superfícies.

Os dois algoritmos de cálculo seguintes já têm em conta a influência do sombreamento de elementos exteriores e a radiação solar que entra na zona térmica é tratada de igual forma.

Por fim, os dois últimos algoritmos de cálculo diferem dos anteriores por considerar que os raios solares que entram na zona térmica não são unicamente absorvidos pelo pavimento (chão), mas também pelas paredes.

Como o modelo apresenta zonas não convexas, como é o caso da caixa de escadas, segundo o programa não é aconselhável a utilização dos últimos dois algoritmos apresentados (*EnergyPlus*, 2013b).

Desta forma, optou-se pelo algoritmo de cálculo *FullExteriorWithReflection*, que difere do *FullExterior* por contabilizar os raios solares reflectidos por superfícies exteriores ao edifício que entram na zona térmica

#### 4.4. Características dos materiais

Após a definição da geometria e zonas térmicas procedeu-se à caracterização dos materiais e soluções construtivas no programa *EnergyPlus*. Grande parte das características das soluções construtivas da envolvente exterior com influência no desempenho higrotérmico, acústico e de luminosidade dependem das propriedades físicas dos materiais (Mendonça, 2005)

#### 4.4.1. Elementos opacos

As propriedades relevantes para o desenvolvimento dos cálculos do fenómeno de transferência de calor e balanço térmico dos espaços são: massa volúmica ( $\rho$ ); condutibilidade térmica ( $\lambda$ ) e calor específico ( $C_p$ ). Os valores que foram considerados são apresentados na Tabela 10 juntamente com o valor da espessura equivalente de cada material, a determinação desta será explicada mais abaixo, e juntamente com as referências de onde foram retirados.

Para efeitos de cálculo foi também necessário definir a rugosidade dos materiais, quanto a esta, o programa contém seis opções: muito rugoso; rugoso; medianamente rugoso; medianamente liso; liso; muito liso. Este factor é utilizado pelo programa no cálculo dos coeficientes de transmissão térmica pois os valores da resistência superficial interior e exterior são dependentes desta propriedade.

Inicialmente todos os materiais foram considerados rugosos tendo-se posteriormente extraído os resultados dos coeficientes de transmissão térmica das soluções existentes e comparado esses valores com os calculados assumindo a resistência térmica superficial interior ( $R_{si}$ ) igual a 0.13 e a resistência térmica superficial exterior ( $R_{se}$ ) igual a 0.04 para elementos verticais. Como os valores se encontravam muito próximos manteve-se esta propriedade dos materiais.

Tabela 10 - Propriedades termofísicas dos materiais.

Elemento construtivo	Material	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$ (W/m°C)	$C_p$ (J/kg°C)	Espessura equivalente (m)	Referência
Paredes Exteriores	Adobe	1880	1.1	880	0.41	$C_p$ : (Clarke, 2001)
	Reboco	1600	0.8	880	0.025	$C_p$ : (Clarke, 2001)
Paredes de tabique Interiores	Revestimento em tinta branca	1880	1.1	880	0.002	$C_p$ : (Clarke, 2001)
	Argila	1880	1.1	880	0.04	$C_p$ : (Clarke, 2001)
	Madeira	750	0.23	1758	0.05	$C_p$ : (Sucrana, 2009)
Parede de madeira Interior	Madeira	870	0.29	1758	0.03	$C_p$ : (Sucrana, 2009)

Tabela 10 – Continuação da apresentação das propriedades termofísicas dos materiais.

Elemento construtivo	Material	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$ (W/m°C)	$C_p$ (J/kg°C)	Espessura equivalente (m)	Referência
Cobertura	Madeira	870	0.29	1758	0.026	$C_p$ : (Sucrana, 2009)
	XPS	33	0.037	1470	0.05	$C_p$ : (Clarke, 2001)
	Telha cerâmica	1500	0.6	800	0.01	$C_p$ : (CTCV, 2012)
Pavimento em contacto com o solo	Massame de terra	1500	1.5	880	0.3	$C_p$ : (Clarke, 2001)
	Betonilha	1600	1.15	840	0.06	$C_p$ : (Clarke, 2001)
	Mosaico cerâmico	2000	0.9	920	0.015	$C_p$ : (Mendonça, 2005)
Pavimento com revestimento em madeira	Soalho	750	0.23	1758	0.025	$C_p$ : (Sucrana, 2009)
	Vigas de madeira	750	0.23	1758	0.048	$C_p$ : (Sucrana, 2009)
	Forro em madeira	750	0.23	1758	0.015	$C_p$ : (Sucrana, 2009)

Nota1: a camada de tinta que reveste as paredes de tabique foi introduzida no modelo para permitir a introdução dos valores relativos à absorptância à radiação térmica, solar e visível (ver Tabela 11), tendo sido assumido que esta camada contém iguais propriedades termofísicas à camada que lhe é adjacente.

Nota2: os valores de  $\rho$  e  $\lambda$  foram retirados do ITE 50 (Pina dos Santos *et al.*, 2006).

Foi necessário calcular uma espessura equivalente para alguns materiais que não são uniformes em toda a sua área, pois o programa *EnergyPlus* exige a introdução do material por camadas aquando a definição das soluções construtivas. Exemplo de uma solução construtiva deste tipo é o pavimento, por conter vigas de madeira espaçadas entre si, sendo os restantes materiais, soalho e forro de madeira, uniformes e constantes em toda a área. A Figura 20 exemplifica este caso.

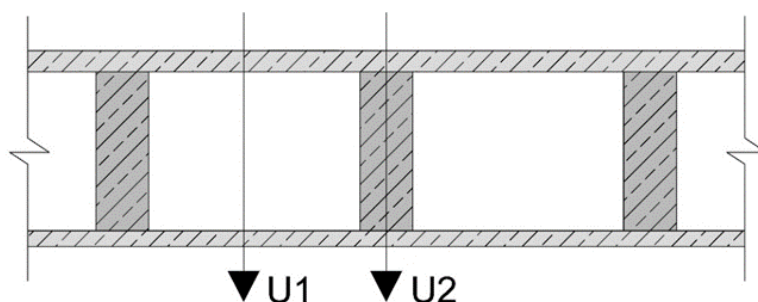


Figura 20 - Solução construtiva do pavimento em estrutura de madeira.



No caso do pavimento em estrutura de madeira, foi portanto, necessário calcular a espessura equivalente das vigas do soalho, bem como determinar a resistência do ar associada ao espaço confinado entre as vigas.

A espessura equivalente é calculada através da determinação prévia do coeficiente de transmissão térmico global da solução construtiva que é determinado segundo a média ponderada da área de cada ponte térmica plana (PTP), de acordo com a equação seguinte:

$$U_{global} = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i \times U_{PTPi})}{A_{total}} \quad (4)$$

Em que:

$U_{global}$  – Coeficiente de transmissão térmico do elemento construtivo ( $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ );

$A_i$  – Área de superfície por onde se transfere o calor da PTPi ( $m^2$ );

$U_{PTPi}$  – Coeficiente de transmissão térmico  $i$  de cada PTPi ( $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ );

$A_{total}$  – Área total do elemento construtivo ( $m^2$ ).

Conhecido este coeficiente global, a condutibilidade térmica dos materiais e as espessuras das restantes camadas de materiais, é possível calcular a espessura equivalente da madeira constituinte das vigas, através da equação presente na ISO 6946 (2007).

$$U_{global} = U_{PTP} = \frac{1}{R_{si} + \sum_{i=1}^n \frac{e_i}{\lambda_i} + R_{se}} \quad (5)$$

Em que

$R_{si}$  – Resistência térmica superficial interior ( $m^2 \text{ } ^\circ C/W$ );

$R_{se}$  – Resistência térmica superficial exterior ( $m^2 \text{ } ^\circ C/W$ );

$e_i$  – Espessura do elemento construtivo  $i$  (m);

$\lambda_i$  – Condutibilidade térmica do elemento construtivo  $i$  ( $W/m \text{ } ^\circ C$ ).

A solução construtiva foi, então, introduzida no programa sob a forma de quatro camadas, uma relativa ao soalho, uma relativa às vigas, uma relativa ao espaço de ar e uma quarta relativa ao forro de madeira.

Para a solução construtiva do pavimento com revestimento em mosaico e para a da cobertura, o procedimento foi idêntico, porém, no caso da parede de tabique não foi determinado o coeficiente de transmissão térmico global, pela sua complexidade. Pois esta solução construtiva é constituída por uma estrutura de madeira, maciça ou reticulada, que é preenchida e revestida por um material terroso (terra simples ou uma argamassa bastarda de terra e cal). Segundo a tese de mestrado “Soluções construtivas tradicionais de revestimento de paredes exteriores em tabique”, realizada na Universidade do Minho (Pinto *et al.*, 2011), o coeficiente de transmissão térmico de uma parede de tabique tem um valor de  $1.59 \text{ W/m}^2\text{°C}$ .

Assim, de modo a introduzir esta solução construtiva no programa assumiu-se que seria composta por uma camada de material terroso, uma camada de madeira e outra camada de material terroso. Conhecido, então, o valor do coeficiente de transmissão térmica, atribuiu-se uma espessura de 4cm a cada uma das camadas de material terroso e determinou-se a espessura relativa à camada equivalente de madeira.

As espessuras equivalentes determinadas encontram-se na tabela anterior, Tabela 10.

#### 4.4.2. Envidraçados e dispositivo de sombreamento

No modelo, para todos os envidraçados existentes foi assumido um coeficiente de transmissão térmica do vão envidraçado de  $5.1 \text{ W/m}^2\text{K}$  (Pina do Santos *et al.*, 2006). Para o factor solar inicialmente assumiu-se o valor 0.88, no entanto, após a fase de validação do modelo que será apresentada na secção 4.10., o valor final foi 0.75. Pensa-se que esta diminuição se deva ao facto de existirem cortinas de pano apresentando alguma transparência como se pode ver na imagem relativa ao envidraçado no 1º andar na Tabela 6, exibida na secção 3.3.2.

O reboco das paredes, argamassa de cal, foi ainda caracterizado segundo a sua absorptância à radiação térmica ( $\alpha_{\text{térmico}}$ ), solar ( $\alpha_{\text{solar}}$ ) e visível ( $\alpha_{\text{visível}}$ ), por serem características importantes a ter em conta na análise do comportamento térmico (ver Tabela 11). Assim como o revestimento das paredes de tabique com tinta branca.

Tabela 11 – Absortâncias do reboco de cal da envolvente exterior.

	$\alpha_{\text{térmica}} (\%)$	$\alpha_{\text{solar}} (\%)$	$\alpha_{\text{visível}} (\%)$
Reboco de cal	0.9	0.14	0.14
Revestimento com tinta branca	0.9	0.2	0.2
Referência	(Lamberts <i>et al.</i> , 2011)		

Quanto às portadas interiores, estas são de madeira e pintadas de branco, as características assumidas no modelo, no campo “*WindowMaterial:Shade*”, encontram-se na Tabela 12.

Tabela 12 - Propriedades das portadas interiores.

Propriedade		Referência
Transmitância solar	0	(Loutzenhiser <i>et al.</i> , 2007)
Reflectância solar	0.65	
Transmitância visível	0	
Reflectância visível	0.73	
Emissividade hemisférica do infravermelho	0.9	(Parker <i>et al.</i> , 2000)
Transmitância do infravermelho	0	
Espessura (m)	0.025	-
Condutividade (W/m.K)	0.23	(Pina dos Santos <i>et al.</i> , 2006)

## 4.5. Ganhos internos

Os ganhos térmicos internos incluem qualquer fonte de calor situada no espaço a aquecer, designadamente, os ganhos de calor associados ao metabolismo dos ocupantes, e todo o calor dissipado nos equipamentos e nos dispositivos de iluminação. São excluídos os ganhos por qualquer sistema de aquecimento (DL n.º118/2013). Como não é conhecido com rigor o padrão de ocupação da única habitante do edifício, assim como o tipo de equipamentos e iluminação existentes, considerou-se que o valor representativo dos ganhos internos é de  $2\text{W/m}^2$  para ambas as estações do ano, ou seja, metade do valor do ganho interno médio indicado pelo REH (DL n.º118/2013), pois o edifício apenas contém um único ocupante. Segundo o antigo regulamento, RCCTE (2006), este valor corresponderia a um edifício com pequena carga de ocupação.

#### 4.6. Sistemas de climatização

O edifício em estudo não dispõe de equipamentos de climatização, logo funciona em regime livre. O único meio de aquecimento que a habitante diz possuir na estação de aquecimento é a lareira, existente na zona térmica ZT11 (sala) e situada no canto inferior esquerdo do rectângulo que representa esta zona térmica em planta (ver Figura 8), ou seja, junto à parede exterior e à parede que divide esta zona da zona ZT10. A lareira funciona no período de 1 de Novembro a 7 de Março, entre as 16h00 e as 22h00.

Como é igualmente desconhecido o valor do ganho interno produzido pela lareira e não foi encontrada qualquer informação ou estudos sobre a quantidade de calor a que um compartimento está sujeito em média por metro quadrado, consoante uma determinada tipologia da lareira, foi necessário estimar um valor de potência.

É de destacar que a energia proveniente da lareira foi introduzida no modelo como um ganho interno, ou seja, potência por metro quadrado ( $\text{W/m}^2$ ) e o seu valor representativo foi obtido aquando da validação do modelo, ou seja, do ajuste entre a curva real e a do modelo. Inicialmente o valor introduzido foi  $55\text{W/m}^2$ , partindo da analogia de que um aquecedor, regra geral, detém uma potência de  $1500\text{W}$ , tendo a zona térmica em questão uma área de  $26.5\text{m}^2$ . No entanto, após a validação o valor que melhor correspondeu ao real foi  $20\text{W/m}^2$ . Esta redução pode ser explicada pela quantidade de energia que é perdida para o exterior, zonas térmicas adjacentes e absorvida pelos elementos de compartimentação e mobiliário (inércia térmica).

Por forma a evidenciar o aumento e redução de temperatura correspondente ao consumo da madeira pelo fogo, o valor foi introduzido gradualmente tendo sido atingido o pico de  $20\text{W/m}^2$  entre as 18h e as 20h. Na Figura 21 é apresentado o diagrama da potência relativo à carga interna produzida pela lareira.

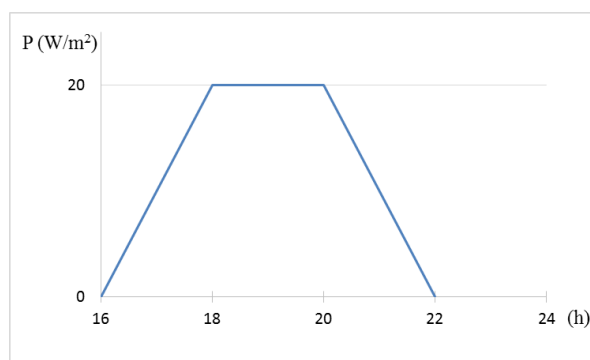


Figura 21 - Diagrama de potência da lareira.

## 4.7. Sistemas de ventilação

O presente caso de estudo não tem qualquer sistema de ventilação, sendo a ventilação natural responsável pela renovação do ar. Esta acontece através de aberturas para o exterior, como as chaminés, a partir da abertura e fecho de janelas ou portas por parte dos ocupantes, mas também através da falta de estanquidade do desvão, que se encontra em ligação com as zonas habitáveis.

Como não foi efectuado nenhum ensaio para a determinação da taxa de renovação do ar, como o método do gás traçador ou porta ventiladora, na criação do modelo teve-se em conta o regulamento nacional (REH) e o facto de se reconhecer que o edifício em estudo é pouco estanque ao ar devido ao desvão ventilado e ao mau isolamento das caixilharias como se pode observar na Figura 22.

Segundo o REH (DL n.º118/2013), nos edifícios de habitação, o valor de taxa de renovação horária de ar deve ser igual ou superior a 0,4 renovações por hora e um “espaço fortemente ventilado” é definido como um local que dispõe de aberturas que permitem a renovação do ar com uma taxa média de pelo menos 6 renovações por hora.

Desta forma, para as zonas pertencentes ao desvão ventilado (ZT13, ZT14 e ZT17) assumiu-se como valor inicial da taxa de renovação de ar  $6 \text{ h}^{-1}$ , para ambas as estações do ano, e para as zonas habitáveis, uma taxa de  $2 \text{ h}^{-1}$  no Verão e  $1.5 \text{ h}^{-1}$  no Inverno. Contudo, após a fase de validação do modelo que será apresentada na secção 4.10. os valores finais foram os seguintes:  $5 \text{ h}^{-1}$  para as zonas do desvão ventilado e  $1.25 \text{ h}^{-1}$  para as zonas habitáveis, em ambas as estações do ano.

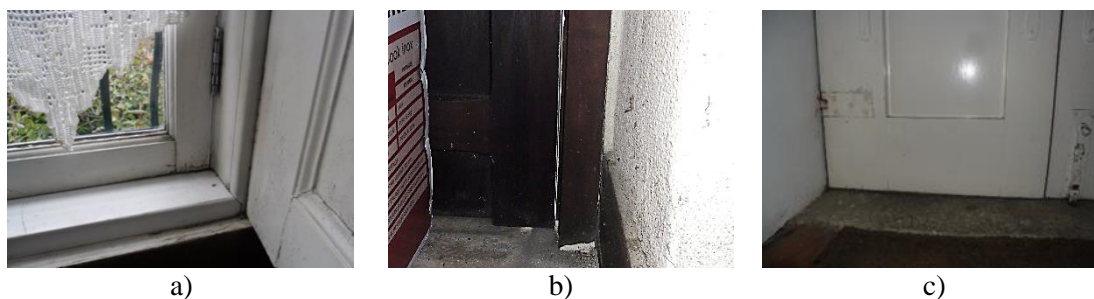


Figura 22 - Vãos de portas e janelas. a) Janela pertencente à zona ZT10; b) Porta pertencente à zona ZT15; c) Porta principal.

#### **4.8. Mobiliário**

No modelo o mobiliário foi definido no campo “*InternalMass*”, tendo sido, portanto, atribuído um volume representativo deste e definido as suas propriedades. Como o mobiliário é feito em madeira, as propriedades consideradas são respectivas a este material, já tendo sido apresentadas na secção 4.4. O volume relativo ao mobiliário considerado para todas as zonas térmicas foi de um terço do volume da zona térmica, em questão. Porém, como nas zonas térmicas ZT3 e ZT4 (arrumos) e ZT16 (salão do sótão) existe um volume considerável de material do tipo têxtil, foi admitido que metade deste volume considerado de massa interna teria as propriedades da madeira e a outra metade teria as propriedades do material do tipo têxtil.

#### **4.9. Padrões de utilização do edifício**

No decorrer da dissertação de mestrado realizada pela Diana Cancela que abordou e estudou o comportamento higrotérmico da casa em estudo, como referido no capítulo 3.1., foi recolhida informação sobre alguns hábitos da única ocupante, relativos à ventilação, aquecimento e arrefecimento.

Sabe-se, então, que a ocupante na estação de Verão abre o postigo da porta principal (ZT9) e uma janela do quarto (ZT10) entre as 07h30 e as 08h00. Durante a estação de Inverno a ocupante acende a lareira existente na sala (ZT11) a partir das 18h30.

#### **4.10. Validação do modelo**

A validação do modelo consiste no confronto entre os valores da temperatura interior obtidos pela medição *in situ* e os valores de temperatura interior obtidos por simulação numérica. Esta é feita apenas segundo as temperaturas interiores pois uma validação higrotérmica, através da humidade relativa, teria um maior grau de dificuldade por ser necessário a definição exaustiva das características de higroscopicidade dos revestimentos, e das peças de mobiliário e decoração (Curado, 2014). Para além de que a análise do conforto interior pela norma europeia EN 15251 (CEN, 2007) apenas requer os valores de temperatura interior.

A validação foi feita para um período de dias, para as duas estações, de modo a permitir uma análise mais detalhada dos seus resultados.

No período de Inverno a validação foi feita com base nos valores do sensor que se encontrava na zona ZT11, que contém uma lareira como fonte de calor. Enquanto no período de Verão foi feita com base nos valores do sensor pertencente à zona ZT16, em detrimento do corredor do 1º andar (ZT9), por este ser um compartimento que dá acesso aos restantes do mesmo piso e aos pisos adjacentes, logo contém variáveis de difícil quantificação que influenciam o seu comportamento térmico (abertura de portas, iluminação e ventilação).

Não é esperado um ajuste perfeito entre os resultados da medição e da simulação, devido à difícil quantificação de todas as variáveis de que o modelo depende, como o perfil de ocupação, de utilização (abertura de portas e janelas, iluminação, uso de equipamentos), taxas de ventilação, condições de vizinhança (vegetação e edifício circundantes) e propriedades dos materiais.

#### 4.10.1. Validação para a estação de aquecimento

No período de Inverno a validação foi realizada para o período de 2 a 9 de Fevereiro de 2013. O resultado da validação encontra-se na Figura 23, que contém a curva com os valores da temperatura medida *in situ*, cenário experimental, a curva com os valores da simulação do modelo, cenário de simulação, e a curva da temperatura exterior. A tabela que acompanha a figura indica os valores da temperatura média para os dois cenários, experimental e de simulação, assim como a média das temperaturas máximas diárias e das temperaturas mínimas diárias, e ainda, a respectiva diferença entre os dois cenários.

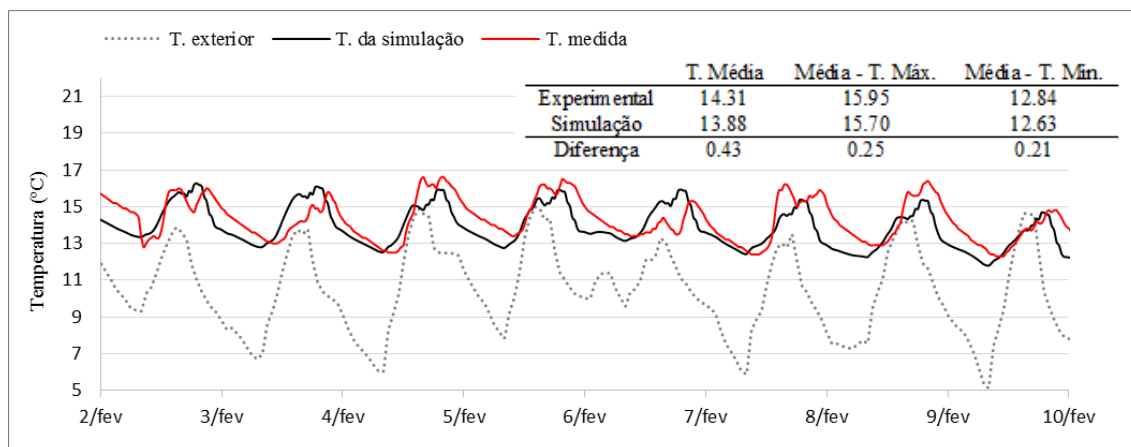


Figura 23 - Resultado da validação no período de Inverno, relativo ao ano 2013.

Analisando a Figura 23 observa-se que a amplitude de ambas as curvas é similar e que os valores máximos e mínimos de cada curva não se encontram muito distantes, existindo uma diferença de  $0.25^{\circ}\text{C}$  entre a média das temperaturas máximas diárias e uma diferença de  $0.21^{\circ}\text{C}$  entre a média das temperaturas mínimas diárias. A média das temperaturas de cada cenário apresenta uma diferença de  $0.43^{\circ}\text{C}$ .

É ainda observável que durante cada dia são atingidos dois picos máximos de temperatura, o primeiro deve-se à máxima temperatura exterior e o segundo deve-se à existência da lareira como meio de aquecimento da zona térmica em análise. É de notar que o primeiro pico máximo e o pico mínimo são atingidos na altura do dia em que se dá o pico máximo e mínimo de temperatura exterior, respectivamente, constatando-se que o modelo responde facilmente às temperaturas exteriores.

No entanto, é possível visualizar um atraso no arrefecimento das temperaturas diárias, da curva experimental em relação à curva de simulação, sendo consequentemente, atingido em primeiro lugar o pico de temperatura mínima pela curva de simulação. Relativamente à curva experimental, após o cessar do funcionamento da lareira observa-se um arrefecimento muito rápido que se traduz num declive mais acentuado e depois um arrefecimento menos rápido até a curva atingir o valor mínimo de temperatura.

Ambos os visíveis atrasos mencionados podem significar que o modelo não representa muito bem o efeito da inércia térmica, característico de edifícios de adobe.

De modo a compreender o efeito que a lareira e da presença do mobiliário têm no comportamento térmico da zona térmica é apresentada, na Figura 24, a curva da temperatura interior sem o funcionamento da lareira (T. sem lareira) e a curva da temperatura interior sem o mobiliário (T. sem mobiliário).



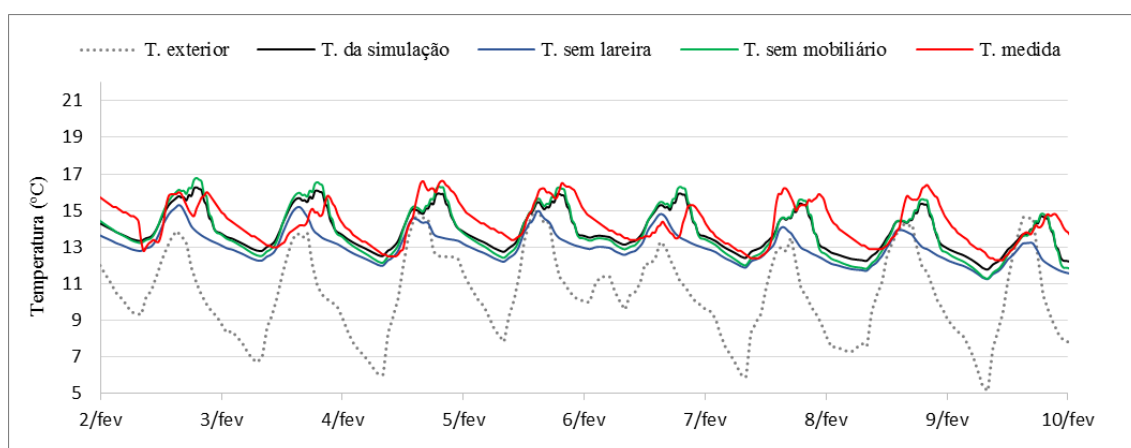


Figura 24 - Resultado das temperaturas interiores da zona térmica com alguns condicionamentos.

Verifica-se que o segundo pico máximo se deve ao funcionamento da lareira e que esta, juntamente com o efeito da presença de mobiliário, faz subir a temperatura interior ao longo de todo o período de Inverno. E no caso de não ter a lareira em funcionamento, a inércia adicional do espaço associado ao mobiliário também beneficia a manutenção da temperatura.

Verifica-se, ainda, que a temperatura máxima atingida é ligeiramente superior no caso da simulação sem mobiliário (inércia adicional), mas em contra partida, a descida da temperatura é mais repentina.

#### 4.10.2. Validação para a estação de arrefecimento

No período de Verão a validação foi realizada para o período de 9 a 16 de Agosto de 2012 e o seu resultado encontra-se na Figura 25.

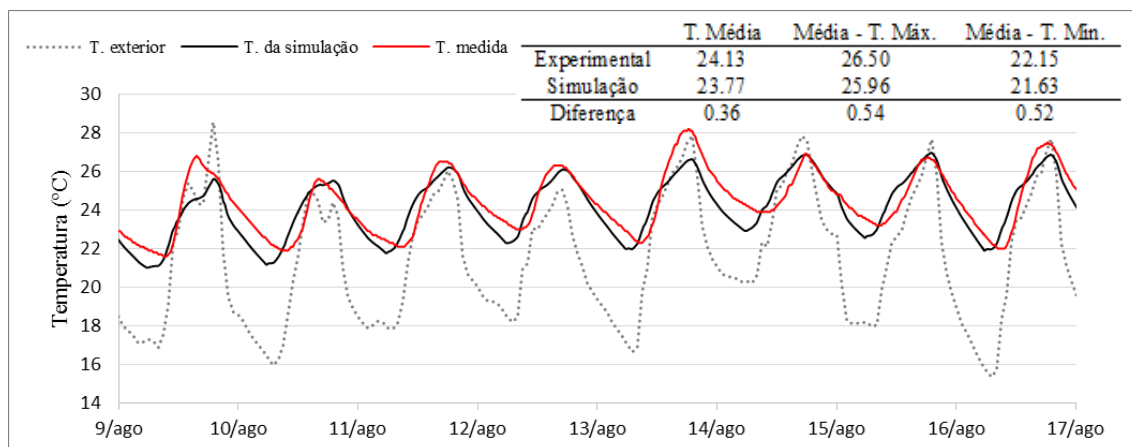


Figura 25 - Resultado da validação no período de Verão.

A partir da Figura 25 verifica-se que, analogamente à validação no período de Inverno, as diferenças entre a temperatura média, a média das temperaturas máximas diárias e a média das temperaturas mínimas diárias não são muito significativas, sendo inferiores a 1°C. São, respectivamente, de 0.36°C, 0.54°C e 0.52°C.

Observa-se que na maioria dos dias os picos máximos das duas curvas são atingidos na mesma altura do dia. Contudo, tal não acontece com os picos mínimos, neste caso a curva do modelo atinge primeiro o valor de temperatura mínima. Neste período de Verão a curva experimental também apresenta um ligeiro atraso relativamente à curva da simulação.

#### 4.11. Síntese

A simulação numérica em regime dinâmico exigiu a criação de um modelo detalhado que traduz o comportamento térmico do edifício simulado. Tendo sido necessário definir a sua geometria, caracterizar os materiais, quantificar dos ganhos internos, sistemas de climatização, grau de ventilação e permeabilidade ao ar (taxa de infiltração), assim como a definir os padrões de utilização do edifício.

De modo a explorar o modelo numérico para estudos de sensibilidade foi realizada a sua validação recorrendo-se às temperaturas medidas *in situ* e à manipulação de um ficheiro climático, que foi construído a partir de dados reais, para um período de tempo em que é feita a validação do modelo, 2 a 9 de Fevereiro de 2013 para a estação de aquecimento e de 9 a 16 de Agosto de 2012 para a estação de arrefecimento.

Tendo em conta que não existe nenhuma norma, regra, que defina se o modelo se encontra validado, considerou-se que este se encontrava validado por apresentar uma diferença entre a temperatura média interior obtida pela medição *in situ* e a temperatura média interior obtida pela simulação, para um intervalo de oito dias, inferior a 0.4°C. A diferença das temperaturas máximas e mínimas, entre a temperatura medidas *in situ* e a temperatura simuladas, inferior a 0.5°C para a estação de aquecimento, e muito próxima de 0.5°C para a estação de arrefecimento.

Assim, será possível desenvolver os estudos de sensibilidade, objectivo da presente dissertação, que consistem na avaliação do desempenho térmico e energético de estratégias de simulação com diferentes soluções construtivas das paredes da envolvente externa, resultantes da evolução do sistema construtivo em adobe (Capítulo 5). Bem como, de diferentes estratégias de reabilitação térmica e energética (Capítulo 6).



# Capítulo 5

---

CADO DE ESTUDO - ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO E ENERGÉTICO

## **5. CASO DE ESTUDO -ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO E ENERGÉTICO**

### 5.1. Considerações gerais

### 5.2. Qualidade térmica da envolvente externa

### 5.3. Estação de Aquecimento

#### 5.3.1. Análise da temperatura interior

#### 5.3.2. Análise do conforto térmico segundo a norma EN 15251

#### 5.3.3. Análise das necessidades energéticas

### 5.4. Estação de arrefecimento

#### 5.4.1. Análise da temperatura interior

#### 5.4.2. Análise do conforto térmico segundo a norma EN 15251

#### 5.4.3. Análise das necessidades energéticas

### 5.5. Análise do desempenho térmico e energético das soluções construtivas da envolvente externa opaca

#### 5.5.1. Caracterização das soluções construtivas

#### 5.5.2. Estação de aquecimento

##### 5.5.2.1. Análise da temperatura e conforto interior

##### 5.5.2.2. Análise das necessidades energéticas

#### 5.5.3. Estação de arrefecimento

##### 5.5.3.1. Análise da temperatura e conforto interior

##### 5.5.3.2. Análise das necessidades energéticas

### 5.6. Síntese

#### 5.6.1. Solução original do caso de estudo

#### 5.6.2. Soluções construtivas da envolvente opaca externa

## **5. CASO DE ESTUDO – ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO E ENERGÉTICO**

O presente capítulo contém a análise do desempenho térmico e energético do modelo numérico representativo do caso de estudo nas suas condições originais, seguida da análise do desempenho térmico e energético do caso de estudo após a aplicação de novas soluções construtivas das paredes exteriores. A primeira análise tem como objectivo compreender o comportamento real do caso de estudo, enquanto a segunda análise pretende justificar se as soluções construtivas das paredes de envolvente externa, que foram surgindo ao longo da primeira metade do século XX, em detrimento do sistema tradicional em adobe, alteraram o seu comportamento térmico.

### **5.1. Considerações gerais**

Apesar de existirem outros parâmetros influenciadores do conforto térmico interior, como foi visto no Capítulo 2, secção 2.2.2, o desenvolvimento do estudo de sensibilidade, assim como se procedeu no caso da validação do modelo, centra-se na temperatura do ar interior. Desta forma, a análise do desempenho térmico teve como base o regulamento nacional REH (DL n.º118/2013) e a norma europeia EN15251 (CEN, 2007), assim como um estudo estatístico dos valores de temperatura interior. Será, portanto, apresentado o estudo da probabilidade acumulada, os valores máximos, mínimos e médios da temperatura do ar interior e os registos do conforto térmico interior segundo a norma europeia, bem como o número de horas que as temperaturas de conforto estão fora do intervalo de conforto adaptativo.

Por outro lado, o desempenho energético é avaliado através da quantidade de energia necessária à obtenção dos níveis de conforto estabelecidos pela norma EN15251, para a categoria III de conforto (edifícios existentes). O valor das necessidades energéticas é obtido através da simulação de um sistema de aquecimento/arrefecimento HVAC (*Heating, Ventilation, Air-Conditioning*) que funciona de acordo com um intervalo de temperatura de referência. Isto é, sempre que a temperatura do ar se encontre fora de um intervalo especificado, o sistema de aquecimento/arrefecimento entra em funcionamento. O intervalo de temperatura introduzido é o intervalo de conforto segundo a norma EN

15251 (CEN, 2007). O valor que será apresentado, será o valor da necessidade energética total que o edifício precisa para aquecer a totalidade das zonas habitáveis.

Salienta-se ainda, que na análise do caso de estudo, apenas se apresentam os resultados de quatro zonas térmicas, duas orientadas a sul (ZT11 e ZT16) e duas orientadas a norte (ZT6 e ZT15), pois um gráfico com os resultados de todas as zonas térmicas tornaria a análise gráfica complexa e pouco clara.

Um dos critérios de selecção destas zonas térmicas foi, portanto, a sua orientação que está associada aos ganhos solares, mas também a zona do edifício em que se encontram, ou seja, têm-se duas zonas pertencentes ao 1º andar (as zonas ZT6 e ZT11) e as outras duas pertencentes ao sótão. Pretende-se com isto verificar se o comportamento térmico desta última zona é mais influenciado pelo comportamento térmico da cobertura estando, portanto, sujeito a maiores amplitudes térmicas. Realça-se que neste grupo estão presentes as zonas térmicas validades, a sala e o salão do sótão (ZT11 e ZT16).

## 5.2. Qualidade térmica da envolvente externa

A transmissão de calor por condução através da envolvente externa dos edifícios é um fenómeno que influi muito no comportamento térmico destes, desta forma, os edifícios devem exibir uma boa resistência térmica dos elementos construtivos (Gonçalves & Graça, 2004).

A inércia térmica é um dos parâmetros que contribui para uma boa qualidade térmica. Como o edifício em estudo é constituído por adobe, deve apresentar uma inércia térmica classificada entre média a forte, o que propiciará bons resultados ao nível do seu desempenho térmico na estação de arrefecimento e na estação de aquecimento, se aquecido continuamente ou em regime intermitente.

Outro parâmetro que contribui para uma boa qualidade térmica da envolvente é o coeficiente de transmissão térmico da envolvente opaca exterior. Segundo o regulamento nacional, REH (DL n.º118/2013), como descrito no Capítulo 2, secção 2.2.1, para edifícios sujeitos a grande intervenção o valor deste parâmetro não deve exceder o presente na Tabela 2, dependendo da zona climática. Ou seja, para uma zona climática II, as paredes de adobe, elemento da envolvente opaca vertical, devem apresentar um valor inferior a  $1.75\text{W/m}^2\text{°C}$ . Na Tabela 13 exibe-se o valor deste parâmetro calculado segundo o ITE50 (Pina dos Santos *et al.*, 2006) e o calculado através da simulação dinâmica.



Tabela 13 - Valor do coeficiente de transmissão térmica da envolvente exterior opaca vertical.

	Calculado manualmente pelo ITE 50	Simulação Numérica	Erro (%)
U (W/m <sup>2</sup> °C)	1.65	1.71	-3.64

Pode constatar-se que o valor calculado segundo as duas formas não ultrapassa o requerido, apresentando um erro de 3.64%. Caso o valor calculado ultrapassasse o requerido, uma das preocupações aquando da definição das estratégias de reabilitação seria, portanto, diminuir este valor abaixo do referenciado. Esta acção poderia acarretar dificuldades na selecção da intervenção, pois tratando-se de um edifício antigo, é importante ter o cuidado de não o descaracterizar arquitectonicamente. Ou seja, ter o cuidado de que a intervenção não interfira com a sua autenticidade, modificando os elementos característicos que o diferenciam. Assim como o cuidado de seleccionar intervenções que não diminuam as condições de habitabilidade e salubridade que, originalmente, eram proporcionadas pelo material.

Relativamente aos vãos envidraçados da envolvente exterior o factor solar também se torna um parâmetro importante a controlar, segundo o REH, os envidraçados cujo somatório das áreas dos vãos envidraçados seja superior a 5% da área de pavimento do compartimento servido por estes e desde que não orientados no quadrante Norte inclusive, devem apresentar um factor solar global do vão envidraçado com os dispositivos de protecção 100% activados, que obedeça a determinadas condições. Os factores solares máximos admissíveis, segundo o regulamento, apresenta-se na Tabela 14 para as diferentes classes de inércia e zonas climáticas. Ou seja, no caso de uma grande intervenção o factor solar do caso de estudo, que se enquadra na zona climática de Verão V2, deve apresentar um valor inferior ou igual a 0.56.

Tabela 14 - Factores solares máximos admissíveis de vãos envidraçados, segundo REH (DL n.º118/2013).

$g_T \text{ máx}$	Zona Climática		
Classe de Inércia	V1	V2	V3
Fraca	0.15	0.10	0.10
Média	0.56	0.56	0.50
Forte	0.56	0.56	0.50

Para além do fenómeno da transmissão de calor por condução, os edifícios também estão sujeitos a trocas de massa de ar, dependendo das diferenças de temperatura e pressão, no caso da ventilação natural. O regulamento, REH (DL n.º118/2013), define como valor mínimo admissível, para edifícios novos ou sujeitos a grande intervenção, uma taxa de renovação do ar de  $0.4h^{-1}$ . Como se pôde verificar no Capítulo 4, secção 4.7, através da validação do modelo, a taxa de ventilação do edifício utilizada, quer na estação de aquecimento, quer na estação de arrefecimento, quer durante o dia e durante a noite, foi de  $1.25h^{-1}$ , não tendo ultrapassado o valor mínimo limite e encontrando-se, portanto, dentro do permitido para garantir condições de conforto e salubridade.

### 5.3. Estação de Aquecimento

#### 5.3.1. Análise da temperatura interior

A temperatura interior é um indicador de conforto térmico, sendo a temperatura de conforto de referência, na estação de aquecimento, de  $18^{\circ}C$  (DL n.º118/2013). A Figura 26 contém o gráfico das temperaturas interiores das quatro zonas térmicas seleccionadas, para as duas semanas mais frias da estação de aquecimento (1 a 15 de Fevereiro), enquanto a Tabela 15 contém a temperatura média, máxima, mínima, mediana e desvio padrão para toda a estação de aquecimento. De modo a entender a nomenclatura da legenda da figura, o nome de cada curva indica a zona térmica que representa e contém entre parênteses a orientação da zona térmica e o piso em que se insere (“1A” para 1º andar e “SO” para sótão).

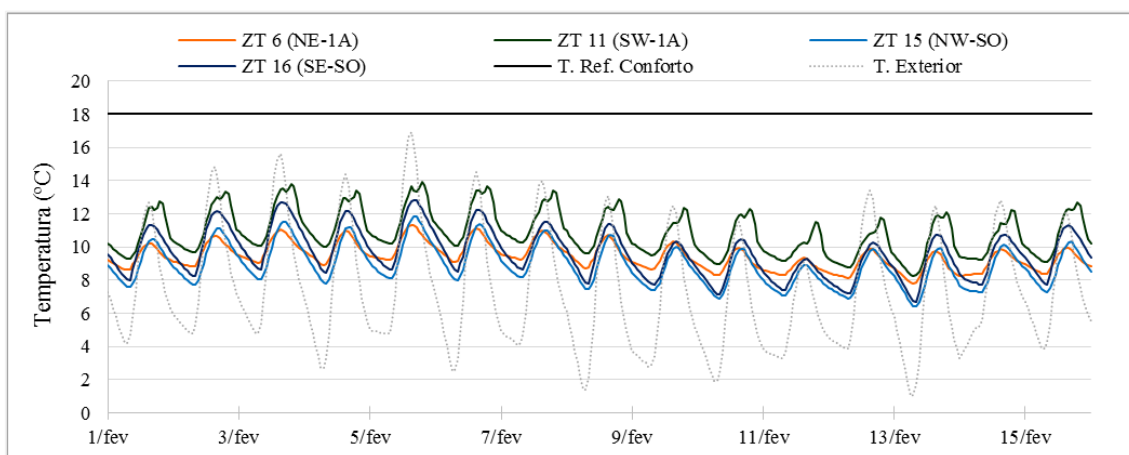


Figura 26 - Gráfico das temperaturas interiores no período de 1 a 15 de Fevereiro.

Tabela 15 - Variáveis estatísticas da temperatura interior durante a estação de aquecimento.

Zona Térmica	T. média (°C)	T. máx. (°C)	T. mín. (°C)	Mediana (°C)	Desvio Padrão (°C)
ZT 6 (NE - 1º Andar)	12.57	19.88	7.80	12.14	2.70
ZT 11 (SW - 1º Andar)	13.81	22.56	8.27	13.28	2.79
ZT 15 (NW - Sótão)	12.30	21.66	6.40	11.74	3.09
ZT 16 (SE - Sótão)	12.88	22.03	6.66	12.31	3.13

A partir da análise da Figura 26 e da Tabela 15 podem retirar-se as seguintes conclusões:

- Os compartimentos analisados orientados a sul apresentam temperaturas interiores superiores aos compartimentos orientados a norte;
- A diferença de temperaturas não é muito significativa nas zonas térmicas pertencentes ao sótão, podendo-se observar uma diferença de cerca de 1°C entre as curvas das zonas térmicas ZT15 e ZT16, em determinados períodos ao longo das duas semanas. No caso das zonas térmicas pertencentes ao 1º andar, pode-se observar em determinados períodos uma diferença de cerca de 2.5°C entre as curvas das zonas térmicas ZT6 e ZT11;
- A diferença entre a temperatura média para as zonas pertencentes ao 1º andar é de 1.24°C, enquanto entre zonas pertencentes ao sótão é de 0.58°C;
- A diferença das temperaturas interiores relativamente à temperatura de conforto de referência (18°C) é elevada;
- A temperatura máxima registada em toda a estação de aquecimento nas zonas térmicas do 1º andar ronda os 21°C, enquanto nas zonas do sótão ronda os 22°C. Relativamente à temperatura mínima registada, esta ronda os 8°C nas zonas térmicas do 1º andar e 6.5°C nas do sótão;
- As maiores amplitudes térmicas ocorrem nas zonas ZT15 e ZT16, o que era expectável, por serem zonas adjacentes à cobertura;
- No que respeita à mediana, a diferença entre esta e o valor da média varia entre 0.4 (ZT6) e 0.6 (ZT15 e ZT16), evidenciando assim, nas últimas duas zonas térmicas, maior susceptibilidade térmica que na primeira. Este resultado é compreensível visto tratarem-se das duas zonas térmicas do sótão, ou seja, duas zonas térmicas que apresentam uma menor inércia térmica e também uma maior permeabilidade ao ar;

- No que respeita ao desvio padrão, indicador da dispersão em torno do valor médio, o maior valor calculado, aproximadamente 3°C, sucede nas zonas térmicas ZT15 e ZT16, corroborando o descrito no ponto anterior.

Uma justificação para a diferença de 2°C observada entre as curvas ZT6 e ZT11 do gráfico pode ser a existência da lareira, sistema de aquecimento, na zona ZT11.

Em relação à constatação de valores de temperatura interior tão distanciados da temperatura de conforto de referência (18°C), uma possível explicação para este acontecimento pode ser a inexistência de sistemas de aquecimento nos compartimentos (à excepção da zona ZT11 que é, consequentemente, a que apresenta os maiores valores de temperatura interior) conjugada com a grande dimensão dos compartimentos e reduzida área envidraçada, valores indicados na Tabela 8.

Por fim, apresenta-se o gráfico da probabilidade cumulativa das temperaturas interiores na Figura 27.

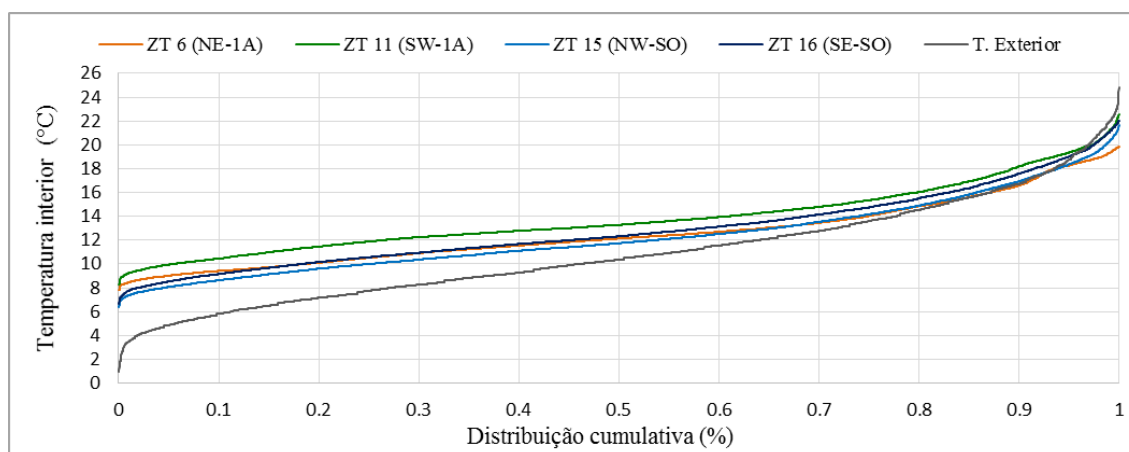


Figura 27 - Gráfico de probabilidade cumulativa durante a estação de aquecimento.

Através do gráfico da probabilidade cumulativa é possível observar um traçado muito próximo do paralelo entre as curvas de temperatura interior. Observa-se também que as temperaturas interiores nunca atingem o valor mínimo atingido pela temperatura exterior, nem o máximo, o que traduz uma boa capacidade de inércia térmica por parte do edifício em estudo. Consequência da inércia térmica da construção (paredes pesadas). Este resultado permite ainda visualizar uma proximidade entre os valores das temperaturas mínimas e máximas das zonas térmicas analisadas.

### 5.3.2. Análise do conforto térmico segundo a norma EN 15251

O resultado da avaliação do conforto térmico segundo a norma EN 15251 (CEN, 2007), para a categoria III de conforto (edifícios existentes), é apresentado na Figura 28 para as zonas térmicas pertencentes ao 1º andar, ZT6 e ZT11, e na Figura 29 para as zonas térmicas pertencentes ao sótão, ZT15 e ZT16. Os pontos representados no gráfico são os resultados de temperatura horários de simulação numérica para toda a estação de aquecimento. Relembra-se que a estação de aquecimento de Ílhavo compreende 6.3 meses (4584 horas), isto é, 1 de Outubro a 9 de Abril. A Tabela 16 apresenta a percentagem de tempo de desconforto térmico e também as horas de desconforto térmico.

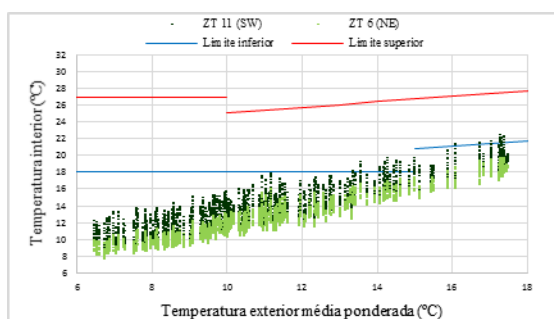


Figura 28 - Conforto térmico das zonas ZT6 e ZT11 na estação de aquecimento.

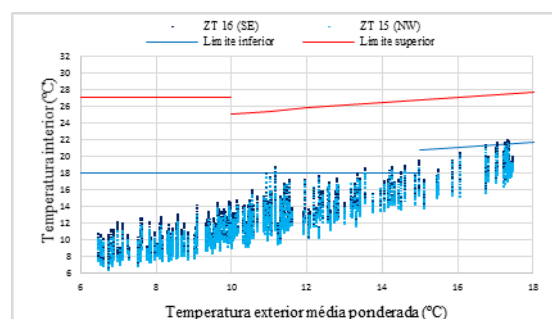


Figura 29 - Conforto térmico das zonas ZT15 e ZT16 na estação de aquecimento.

Tabela 16 - Tempo de desconforto térmico na estação de aquecimento.

Zona Térmica	Tempo de desconforto térmico (%)	Tempo de desconforto térmico (h)
ZT6 (NE - 1ºAndar)	100.00	4584
ZT11 (SW - 1ºAndar)	96.38	4418
ZT15 (NW - Sótão)	98.84	4531
ZT16 (SE - Sótão)	96.95	4444

Observando a Figura 28 e 29 e a Tabela 16 constata-se o seguinte:

- A zona térmica ZT6 nunca atinge a temperatura mínima de conforto (18°C), apresentando uma percentagem de tempo de desconforto térmico de 100%;
- As restantes três zonas térmicas apresentam uma percentagem de desconforto que não é a máxima, mas igualmente elevada, ultrapassando a temperatura mínima de conforto apenas de forma pontual;

- Confrontando os dois registos (Figura 28 e 29) verifica-se o que se observou na secção anterior, que as zonas ZT15 e ZT16 associadas ao sótão apresentam maiores amplitudes térmicas diárias;
- Embora as diferenças entre as percentagens de desconforto sejam muito pequenas, ainda é possível apurar que as percentagens de desconforto mais baixas ocorrem nas zonas orientadas a Sul.

De uma forma geral, conclui-se que o edifício se encontra longe de cumprir os valores mínimos de conforto térmico estipulados pela norma europeia EN 15251 (CEN, 2007).

### 5.3.3. Análise das necessidades energéticas

Nesta secção apresenta-se a avaliação das necessidades energéticas do edifício para garantir o nível mínimo de conforto, admitido pela norma EN 15251 (CEN, 2007), uma temperatura de 18°C. Este valor é obtido simulando um sistema de aquecimento no programa, como explicado na secção 5.1.

Calculando as necessidades de aquecimento para toda a estação, chega-se à conclusão que o edifício necessita de 29414.38kWh, ou seja, de 138.16kWh/m<sup>2</sup>a. O gráfico que exhibe as necessidades energéticas mensais da solução original do caso de estudo, ao longo da estação de aquecimento, é apresentado na Figura 30.

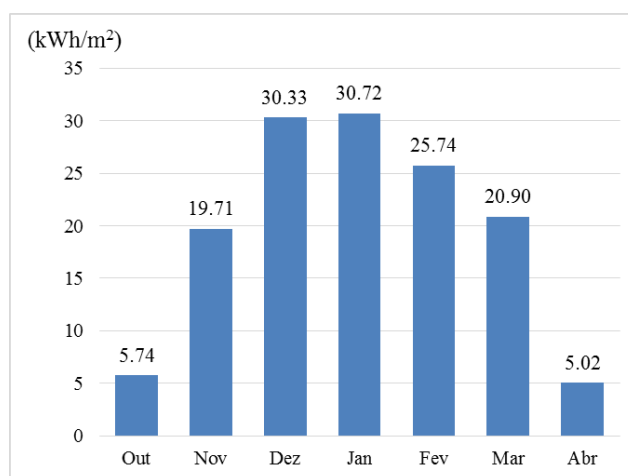


Figura 30 - Necessidades energéticas mensais para a estação de aquecimento.

Os dois meses, Janeiro e Dezembro, requerem a maior quantidade de energia de aquecimento, em média 30.50kWh/m<sup>2</sup>a. Por outro lado, o mês de Outubro e os 9 dias do mês de Abril necessitam de uma menor parcela de energia para aquecimento, 5.74kWh/m<sup>2</sup>a e 5.02kWh/m<sup>2</sup>a respectivamente. O mês de Outubro necessita apenas desta energia porque neste mês a temperatura média exterior é satisfatória, de 15,55°C (pode comprovar-se que ronda este valor através da Figura 17, no Capítulo 4.

## 5.4. Estação de Arrefecimento

### 5.4.1. Análise da temperatura interior

No caso da estação de arrefecimento a temperatura de conforto de referência é de 25°C (DL n.º118/2013). Na Figura 31 observa-se as temperaturas interiores das quatro zonas térmicas seleccionadas para as duas semanas mais quentes da estação de arrefecimento (7 a 21 de Agosto), enquanto a Tabela 17 contém as variáveis estatísticas.

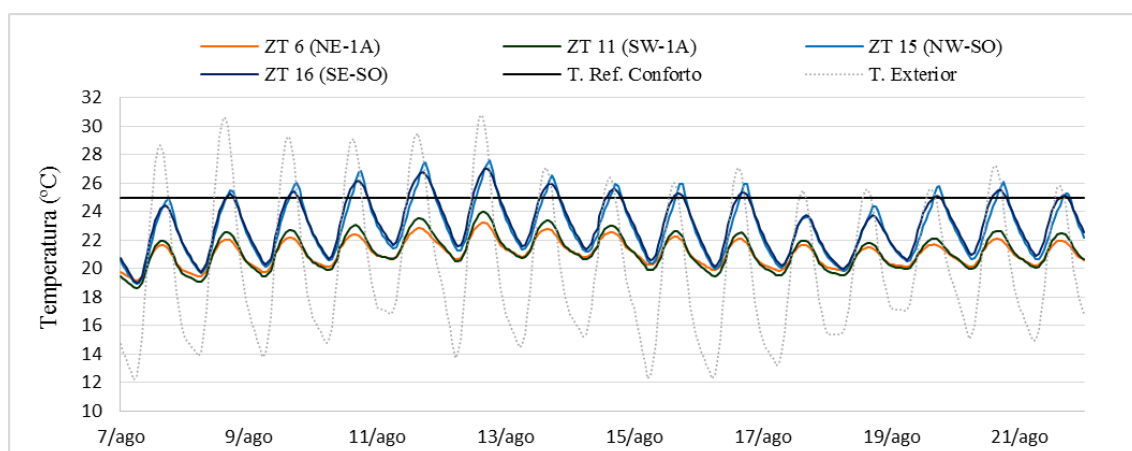


Figura 31 -Gráfico das temperaturas interiores no período de 7 a 21 de Agosto.

Tabela 17 - Variáveis estatísticas da temperatura interior durante a estação de arrefecimento.

Zona Térmica	T. média (°C)	T. máx. (°C)	T. mín. (°C)	Mediana (°C)	Desvio Padrão (°C)	ΔT diária (°C)
ZT 6 (NE - 1ºAndar)	20.07	23.28	17.28	20.08	1.19	1.91
ZT 11 (SW - 1ºAndar)	20.06	24.00	16.51	20.06	1.39	2.62
ZT 16 (SE - Sótão)	21.73	27.29	16.92	21.67	1.98	4.91
ZT 15 (NW - Sótão)	21.61	27.71	16.85	21.48	2.08	4.33

Dos resultados apresentados na Figura 31 e Tabela 17 pode concluir-se o seguinte:

- A temperatura de referência de conforto (25°C) apenas é atingida e excedida pelas zonas térmicas ZT15 e ZT16. Tal verifica-se durante toda a estação pois as outras duas zonas térmicas registam uma temperatura máxima abaixo deste valor;
- As curvas de temperatura das zonas térmicas pertencentes ao 1º andar (ZT6 e ZT11) apresentam um comportamento muito semelhante ao longo das semanas, bem como as outras duas curvas (ZT15 e ZT16). As temperaturas médias relativas a toda a estação de aquecimento comprovam esta observação pois não diferem muito entre si;
- As maiores amplitudes térmicas são verificadas para as zonas ZT15 e ZT16, rondando os 4.5°C, enquanto as outras zonas apresentam uma amplitude térmica que ronda os 2°C;
- A diferença entre a média e a mediana é maior nas zonas térmicas ZT15 e ZT16, no entanto, esta é de apenas 0.1°C, enquanto nas zonas ZT6 e ZT11 esta diferença é nula. Estes valores demonstram uma estabilidade da temperatura.
- Relativamente ao desvio padrão os seus valores são coerentes com o que foi constatado anteriormente, sendo as zonas ZT15 e ZT16 as que apresentam o valor mais alto, de aproximadamente 2°C e as zonas ZT6 e ZT11 apresentam um valor próximo de 1.3°C.
- De uma forma geral conclui-se que durante a estação de arrefecimento o caso de estudo exhibe temperaturas que rondando os 20 a 21°C, sendo estas temperaturas, segundo o REH (DL n.º118/2013), demasiado baixas para se garantir o conforto térmico do edifício. Contudo, tal minimiza o risco do edifício ficar sujeito a períodos de sobreaquecimento, fenómeno que será abordado na secção seguinte.

Por último, é apresentada, na Figura 32, a probabilidade cumulativa das temperaturas interiores.



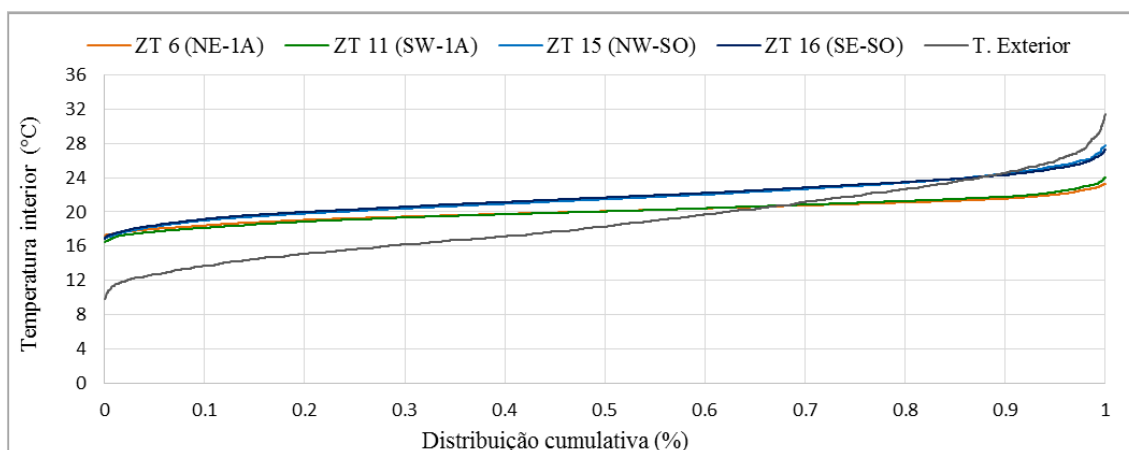


Figura 32 - Gráfico de probabilidade cumulativa durante a estação de arrefecimento.

Pela análise dos registos da probabilidade cumulativa nota-se que as curvas de temperatura ZT6 e ZT11 e as curvas ZT15 e ZT16 praticamente coincidem. As temperaturas interiores mínimas nunca atingem o valor mínimo atingido pela temperatura exterior, nem o valor máximo, evidenciando-se mais uma vez a boa capacidade de amortecimento das temperaturas exteriores (inércia térmica).

#### 5.4.2. Análise do conforto térmico segundo a norma EN 15251

Os resultados da avaliação do conforto térmico segundo a norma EN 15251, para a estação de arrefecimento, encontram-se expostos na Figura 33 para as zonas térmicas ZT6 e ZT11, e na Figura 34 para as zonas térmicas ZT15 e ZT16. Segundo este tipo de análise, os limites de conforto variam consoante a temperatura média do ar exterior (modelo adaptativo). Na Tabela 18 apresenta-se a percentagem e as horas de desconforto térmico. O estudo foi realizado para toda a estação de arrefecimento convencional (2928 horas), ou seja, de 1 de Junho a 30 de Setembro.

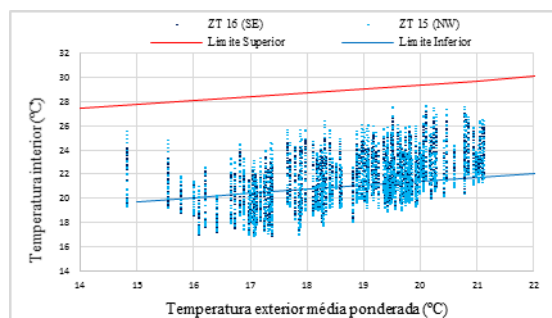
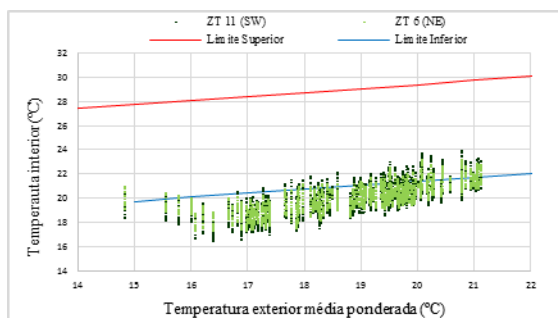


Figura 33 - Conforto térmico das zonas ZT6 e ZT11, para a estação de arrefecimento. Figura 34 - Conforto térmico das zonas ZT15 e ZT16, para a estação de arrefecimento.

Tabela 18 - Tempo de desconforto térmico para a estação de arrefecimento.

Zona Térmica	Tempo de desconforto térmico (%)	Tempo de desconforto térmico (h)
ZT6 (NE - 1ºAndar)	83.67	2450
ZT11 (SW - 1ºAndar)	78.21	2290
ZT15 (NW - Sótão)	40.92	1198
ZT16 (SE - Sótão)	36.68	1074

Observando os gráficos da Figura 33 e 34 e a Tabela 18 constata-se o seguinte:

- Os compartimentos do sótão apresentam uma percentagem de desconforto térmico inferior a 50% sem sofrerem sobreaquecimento;
- É claramente visível que as menores amplitudes térmicas são atingidas nas zonas pertencentes ao 1º andar;
- A zona que apresenta maior quantidade de horas de desconforto é a zona térmica ZT6, com 2450 horas num total de 2928 horas.

No que diz respeito à avaliação da estação de arrefecimento, aqui revela-se que a norma não está bem adaptada à avaliação do conforto térmico, por considerar que as temperaturas entre 18°C a 20°C contribuem para a percentagem de desconforto, o que não se considera muito realista.

### 5.4.3. Análise das necessidades energéticas

Como não se verificou sobreaquecimento, durante esta estação, não é necessário recorrer a sistemas energéticos para o arrefecimento do edifício. Embora os valores de temperatura interior se encontrem, mais de metade do tempo total da estação, abaixo do

nível inferior de conforto, nomeadamente nas zonas térmicas pertencentes ao 1º andar, não foram calculadas necessidades de aquecimento.

## **5.5. Análise do desempenho térmico e energético das soluções construtivas da envolvente externa opaca**

Para a realização desta análise houve a necessidade de avaliar uma zona térmica pertencente ao r/c, devido à existência de soluções mistas que apresentam um tipo de solução construtiva da envolvente externa opaca diferente entre o r/c e a restante altura do edifício (1º andar e sótão). A zona seleccionada foi a ZT4, orientada a sudoeste. A outra zona térmica analisada é a ZT11.

### **5.5.1. Caracterização das soluções construtivas**

As soluções construtivas das paredes exteriores que se consideraram para o estudo que pretende averiguar se a evolução dos sistemas construtivos provocou melhorias ao nível do desempenho térmico e energético, sendo objecto de simulação, encontram-se descritas na Tabela 19. A informação relativa às soluções construtivas em adobe e alvenaria de tijolo foi levantada pela Arquitecta Alice Tavares que se encontra a desenvolver um estudo de caracterização das soluções construtivas sucessoras ao sistema tradicional em adobe, no período do século XX. Na Tabela 19 é também apresentado o valor do coeficiente de transmissão térmica adquirido após a simulação do modelo e o valor da massa relativa a cada solução construtiva.

As soluções a estudar são cinco e pertencem a épocas diferentes. A solução construtiva denominada como solução SA corresponde à solução construtiva do caso de estudo. A solução SD corresponde ao sistema construtivo tradicional de adobe e a solução SE corresponde à solução construtiva híbrida que se começou a implementar na primeira metade do século XX devido à introdução de materiais de tecnologia mais recente, como o betão armado e o tijolo (Tavares *et al.*, 2012b). Por fim, as restantes duas soluções construtivas das paredes da envolvente externa, SB e SC, são as que surgiram mais recentemente e que utilizam um único material construtivo, o tijolo cerâmico.

Tabela 19 - Caracterização das soluções construtivas das paredes exteriores.

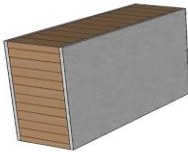
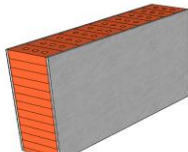
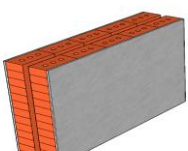

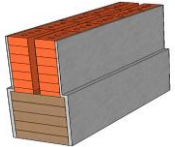
Solução		Descrição	Coeficiente de Transmissão Térmica - U (W/m <sup>2</sup> .°C)	
Solução A (SA)	 <p><math>M_i = 865 \text{ kg/m}^2</math></p>	<p>Solução que apresenta o caso de estudo, caracterizando-se por um único pano de alvenaria de adobe (41x30x12), uma espessura de 41 cm e reboco de cal em ambas as faces com uma espessura de 2.5cm.</p> <p>A espessura total da parede é de 46cm, <math>\lambda_{\text{adobe}}=1.1 \text{ W/m.}^\circ\text{C}</math>.</p>	1.71	
Solução B (SB)	 <p><math>M_i = 594 \text{ kg/m}^2</math></p>	<p>Solução que se caracteriza por ter um único pano de alvenaria de tijolo de três furos, de formato 30x15x8 e reboco de argamassa cimentícia em ambas as faces com uma espessura de 1.5 cm.</p> <p>A espessura total da parede é de 33cm, <math>\lambda_{\text{tijolo}}=0.66 \text{ W/m.}^\circ\text{C}</math>.</p>	1.56	
Solução C (SC)	 <p><math>M_i = 630 \text{ kg/m}^2</math></p>	<p>Solução constituída por um pano duplo de tijolo com caixa-de-ar de 5cm, contendo tijolos de dimensão 30x15x8 e reboco de argamassa cimentícia em ambas as faces com 1.5cm de espessura.</p> <p>A espessura total da parede é de 38cm, <math>\lambda_{\text{tijolo}}=0.60 \text{ W/m.}^\circ\text{C}</math>.</p>	1.15	
Solução D (SD)	 <p><math>M_i \text{ (1º andar)} = 658 \text{ kg/m}^2</math>  <math>M_i \text{ (r/c)} = 940 \text{ kg/m}^2</math></p>	<p>Solução mista, constituída por um pano de alvenaria de adobe no r/c em que os blocos de adobe são colocados transversalmente e, na restante altura do edifício, um pano em que os blocos são colocados longitudinalmente. Os blocos de adobe têm dimensão 45x30x12 sendo rebocados em ambas as faces com uma argamassa de cal com 2.5cm de espessura.</p> <p>A espessura total da parede no r/c é de 50cm e na restante altura do edifício é de 35cm. <math>\lambda_{\text{adobe}}=1.1 \text{ W/m.}^\circ\text{C}</math>.</p>	R/C	1.61
			1º Andar	2.06

Tabela 19 – Continuação da caracterização das soluções construtivas das paredes exteriores.

Solução		Descrição	Coeficiente de Transmissão Térmica - U (W/m <sup>2</sup> .°C)	
Solução E (SE)	 <p> <math>M_{i(1^{\circ} \text{ andar})} = 684 \text{ kg/m}^2</math>  <math>M_{i(r/c)} = 865 \text{ kg/m}^2</math> </p>	<p>Solução mista, contendo um pano de alvenaria de adobe no r/c e um pano duplo de alvenaria de tijolo na restante altura do edifício. Os blocos de adobe 41x30x12 são aplicados transversalmente e em pano único, sendo rebocados em ambas as faces com argamassa de cal com 2.5cm de espessura. O pano duplo é constituído por tijolos de três furos de dimensão 30x15x8, uma caixa-de-ar de 5cm de espessura e reboco de argamassa cimentícia aplicado em ambas as faces com uma espessura de 1.5cm.</p> <p>A espessura total da parede é de 46cm no r/c, enquanto na restante altura do edifício é de 38cm. <math>\lambda_{\text{adobe}}=1.1 \text{ W/m.}^{\circ}\text{C}</math> e <math>\lambda_{\text{tijolo}}=0.60 \text{ W/m.}^{\circ}\text{C}</math>.</p>	R/C	1.71
			1º Andar	1.15

Os novos sistemas construtivos são constituídos por alguns materiais distintos do caso de estudo original, tendo sido portanto introduzidas as respectivas propriedades térmicas, no modelo, como definidas na secção 4.4. Relativamente ao tijolo, o valor da condutibilidade térmica (0.66W/m°C) e da massa volúmica (1800kg/m<sup>3</sup>) foram retirados do ITE50 (Pina dos Santos *et al.*, 2006) e o valor do calor específico (850J/kg°C) do programa WUFI (Jerónimo, 2014). No entanto, como a disposição dos tijolos de três furos difere da solução SB para a SC e SE calculou-se a condutibilidade térmica equivalente, contabilizando os furos (perfuração vertical). Estes resultados encontram-se expostos na Tabela 20.

Tabela 20 - Condutibilidade térmica equivalente dos tijolos cerâmicos.

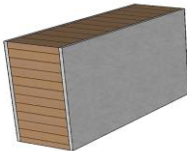
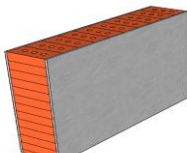
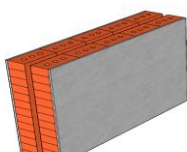

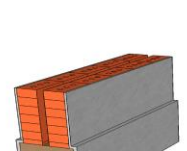
$\lambda_{\text{ITE50}} [\text{W}/(\text{m}^{\circ}\text{C})]$	$\lambda_{\text{Solução B}} [\text{W}/(\text{m}^{\circ}\text{C})]$	$\lambda_{\text{Solução C}} = \lambda_{\text{Solução E}} [\text{W}/(\text{m}^{\circ}\text{C})]$
0.69	0.66	0.60

## 5.5.2. Estação de Aquecimento

### 5.5.2.1. Análise da temperatura e conforto térmico

A análise do comportamento térmico e conforto interior das diversas soluções construtivas aplicadas ao modelo é realizada através da avaliação da temperatura interior e do conforto interior, segundo a Norma Europeia EN 15251 (CEN, 2007). Desta forma, apresenta-se de seguida uma tabela, Tabela 21, com a síntese de resultados para esta estação, com a temperatura média e mínima, e com os resultados da análise do conforto interior e da necessidade energética requerida pelo edifício, segundo a norma europeia. Este último resultado é obtido através do processo já explicado na secção 5.1, do presente capítulo 5.

Tabela 21 - Análise da temperatura interior, conforto térmico e necessidades energéticas das diferentes soluções construtivas, para a estação de aquecimento.

Simulação		Zona	T. méd. (°C)	T. mín. (°C)	Descon- -forto (%)	Descon- -forto (h)	Necessidades Energéticas (kWh/m²)
SA		ZT4	14.72	11.16	98.89	4533	138.16
		ZT11	13.81	8.27	96.38	4418	
SB		ZT4	15.15	11.55	97.56	4472	127.31
		ZT11	14.59	8.87	91.86	4211	
SC		ZT4	15.27	11.77	97.23	4457	122.36
		ZT11	14.70	9.06	91.64	4201	
SD		ZT4	15.14	11.57	97.40	4465	132.22
		ZT11	14.55	8.80	92.04	4219	
SE		ZT4	15.04	11.46	97.84	4485	129.33
		ZT11	14.10	8.55	95.40	4373	

Através da análise dos resultados contidos na Tabela 21 é possível constatar o seguinte:

- A temperatura interior média para as diferentes soluções varia muito pouco, quer para a zona térmica ZT4, quer para a zona térmica ZT11. O maior valor é registado pela solução SC, de 15.27°C na ZT4 e de 14.70°C na ZT11. O menor valor é registado para a solução SA, de 14.72°C na ZT4 e de 13.81°C na ZT11. Constata-se, então, que a maior diferença entre as temperaturas médias é de 0.55°C para a zona térmica ZT4 e de 0.89°C para a zona térmica ZT11, não chegando sequer a 1°C de diferença;
- Através do observado anteriormente, conclui-se que os valores da temperatura média de cada solução, e para ambas as zonas térmicas analisadas, variam muito pouco entre si;
- Relativamente à temperatura mínima, a solução que apresenta o valor mais baixos é igualmente a SA, de 11.16°C para a zona térmica ZT4 e de 8.27°C na ZT11. No entanto, as restantes soluções não exibem valores muito diferentes destes, variando pouco mais que 0.5°C. A temperatura mínima mais elevada é registada pela solução SC;
- Comparando as duas zonas térmicas, para todas as soluções, a zona pertencente ao r/c (ZT4) aparenta sempre, valores de temperatura interior acima dos registados na zona ZT11. A partir deste resultado observa-se a variabilidade da temperatura interior do piso mais elevado à temperatura exterior;
- Relativamente à percentagem de tempo de desconforto, a solução SA aparenta o maior valor para as duas zonas térmicas, de 98.89% e 96.38%, respectivamente para a ZT4 e ZT11. Por sua vez, o valor mais baixo está associado à solução SC, de 97.23% e 91.64%, respectivamente para a ZT4 e ZT11;

A partir da primeira constatação percebe-se que existe uma reduzida variabilidade na temperatura interior média entre as diferentes soluções construtivas da envolvente externa estudadas.

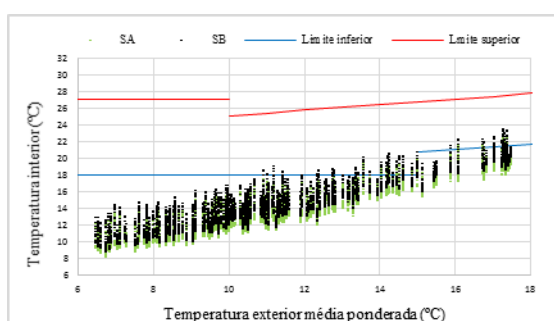
A solução que apresenta os melhores resultados é a solução SC, cujo coeficiente de transmissão térmica é de 1.15W/m<sup>2</sup> °C. A diferença entre a temperatura média obtida por esta solução e a que apresentou piores resultados, solução SA, é cerca de 0.5°C para a zona térmica ZT4 e cerca de 0.9°C para a zona térmica ZT11. Consequentemente, a diferença entre a percentagem de desconforto também é reduzida, sendo cerca de 2% para a zona



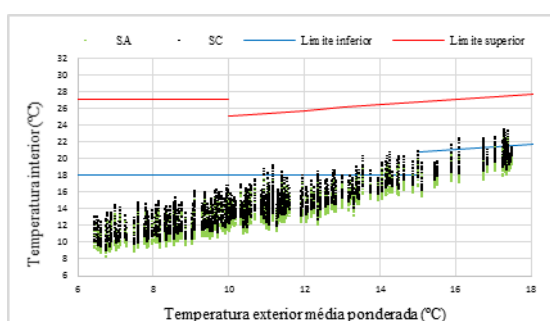
ZT4 e cerca de 5% para a zona ZT11. A diferença entre a necessidade energética requerida é de aproximadamente 16 kWh/m<sup>2</sup>a.

O maior desconforto térmico verificado não é obtido para a solução que apresenta o maior valor de coeficiente de transmissão térmica, 2.06W/m<sup>2</sup>.°C (1º andar da solução SD), constatando-se que o desconforto não é exclusivamente associado a este aspecto.

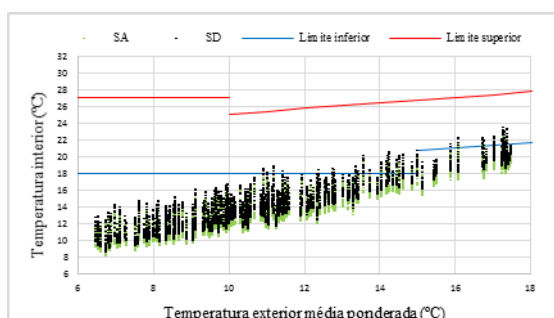
De modo a melhor visualizar os resultados que dizem respeito ao conforto térmico, são apresentados, na Figura 35 e 36, os gráficos com a ilustração dos resultados horários da temperatura interior e os limites preconizados pela norma EN 15251. Na Figura 35 encontram-se os resultados relativos à zona térmica ZT11 e na Figura 36 os que são relativos à zona térmica ZT4. Esta análise sobrepõe a solução construtiva original (caso de estudo) com cada uma das restantes, por forma a facilitar a comparação entre os diferentes comportamentos térmicos.



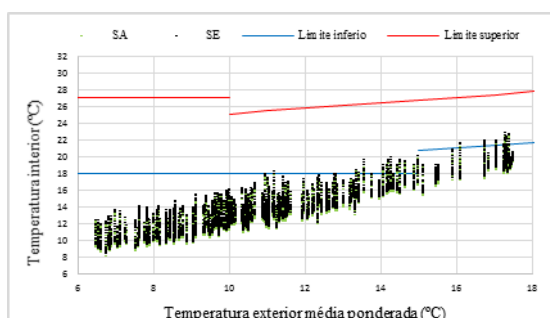
a) Confronto das soluções SA e SB



b) Confronto das soluções SA e SC



c) Confronto das soluções SA e SD



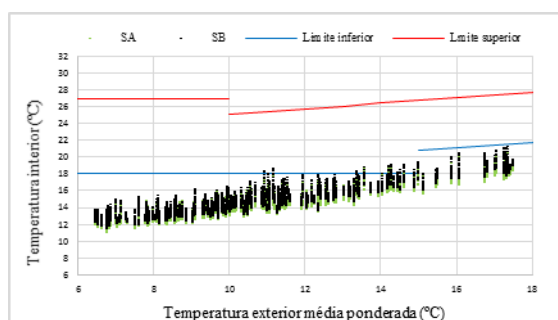
d) Confronto das soluções SA e SE

Figura 35 - Comparação do conforto térmico entre a solução original (SA) e as restantes, para a zona térmica ZT11, para a estação de aquecimento.

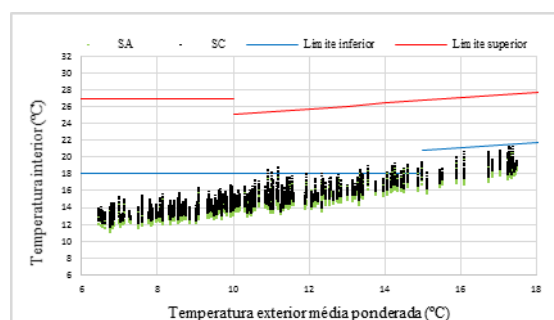
Através da análise detalhada são notáveis as diferenças entre as soluções SA e SB, as soluções SA e SC e as soluções SA e SD. Porém, a diferença entre as soluções SA e SE, praticamente não existe, revelando um comportamento térmico muito semelhante.

Este resultado demonstra que embora a solução SE seja constituída por uma solução construtiva caracterizada por um valor do coeficiente de transmissão térmico mais baixo nos pisos elevados (1º andar e sótão) não implica uma melhoria relevante no comportamento térmico do edifício.

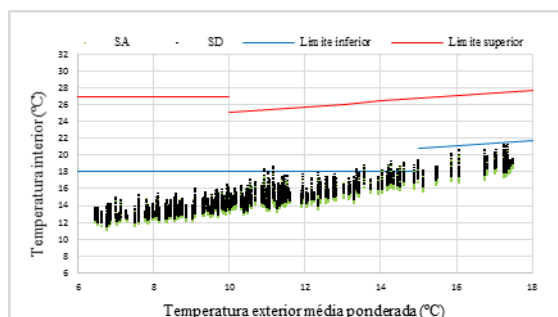
Os resultados para a zona térmica do r/c, ZT4, são apresentados em seguida.



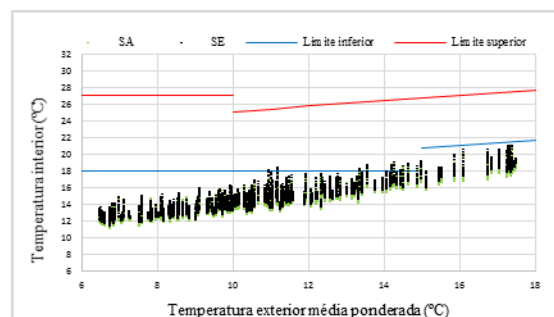
a) Confronto das soluções SA e SB



b) Confronto das soluções SA e SC



c) Confronto das soluções SA e SD



d) Confronto das soluções SA e SE

Figura 36 - Comparação do conforto térmico entre a solução SA e as restantes, para a zona térmica ZT4, para a estação de aquecimento.

Relativamente à zona térmica ZT4 o que se observa entre a comparação das soluções é análogo ao observado para a zona térmica ZT11. A diferença, que é imediatamente perceptível, entre as zonas térmicas ZT11 e ZT4 é a amplitude térmica. Nota-se, claramente, que existem maiores amplitudes térmicas na zona térmica analisada no 1º andar, em relação ao r/c, esta última zona mais estável em termos de temperatura, por ter

uma percentagem de aberturas mais baixa e também pela função do terreno/pavimento como volante térmico.

Embora tenham sido notadas diferenças na temperatura do espaço interior entre as soluções estudadas, observa-se, quer na Figura 35 quer na Figura 36, que estas atingem o intervalo de conforto adaptativo, somente, de forma pontual.

### 5.5.2.2. Análise das necessidades energéticas

Relativamente às necessidades energéticas requeridas por cada solução construtiva da envolvente opaca exterior, na Figura 37 é apresentada a comparação entre elas.

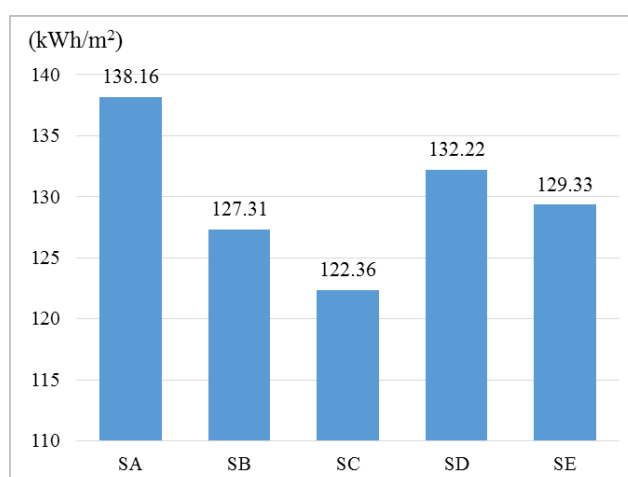


Figura 37 - Necessidades de aquecimento das diferentes soluções construtivas da envolvente externa opaca.


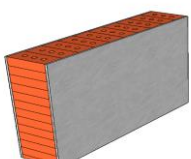
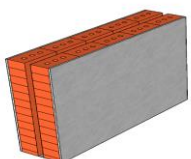

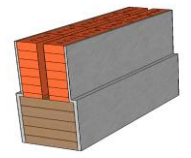
Obviamente, as necessidades energéticas estão directamente relacionadas com a percentagem de tempo de desconforto, a solução SA é a que apresenta a maior necessidade energética, de 138.16kWh/m²a, enquanto a solução SC apresenta a menor, de 122.36kWh/m²a. A diferença entre o máximo e mínimo requerido é de apenas cerca de 16kWh/m²a. Ou seja, as soluções apresentam, tal como o comportamento térmico, necessidades energéticas muito semelhantes entre si.

### 5.5.3. Estação de Arrefecimento

#### 5.5.3.1. Análise da temperatura e conforto térmico

A síntese dos resultados da análise da temperatura interior e conforto térmico durante a estação de arrefecimento apresenta-se na Tabela 22.

Tabela 22 - Análise da temperatura interior, conforto térmico e amplitude térmica das diferentes soluções construtivas, para a estação de arrefecimento.

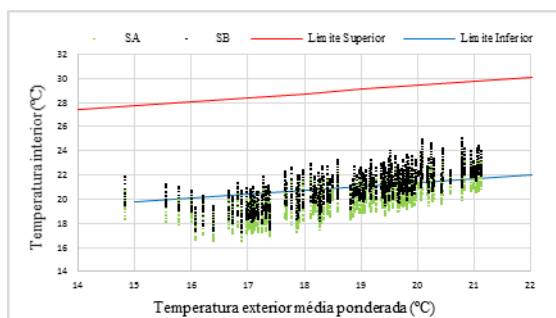
Simulação	Zona	T. méd. (°C)	T. máx. (°C)	Descon- -forto (%)	Descon- -forto (h)	$\Delta T$ diária (°C)
SA 	ZT4	19.28	22.48	96.41	2823	2.40
	ZT11	20.06	24.00	78.21	2290	2.62
SB 	ZT4	20.05	23.36	83.85	2455	2.24
	ZT11	21.03	25.18	48.84	1430	2.42
SC 	ZT4	19.94	23.21	85.96	2517	2.34
	ZT11	20.97	25.08	51.57	1510	2.54
SD 	ZT4	20.06	23.35	83.13	2434	2.37
	ZT11	21.08	25.21	46.99	1376	2.41
SE 	ZT4	20.23	23.56	79.41	2325	2.33
	ZT11	21.69	25.90	27.49	805	2.42

Através da síntese de resultados apresentada na Tabela 22, é possível constatar o seguinte:

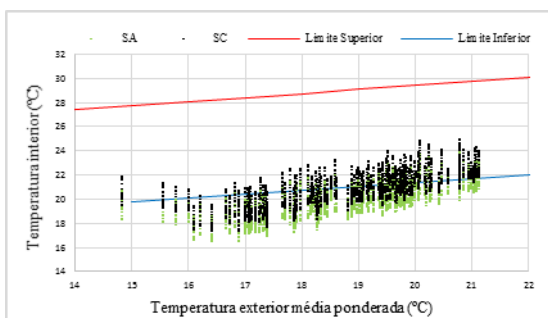
- Os maiores valores da temperatura média registados são obtidos pela solução SE, sendo de 20.23°C para a zona térmica ZT4 e de 21.69°C para a zona térmica ZT11. Enquanto o menor valor corresponde à solução SA, sendo de 19.28°C para a zona térmica ZT4 e de 20.06°C para a zona térmica ZT11. Constata-se, então, que a maior diferença entre as temperaturas médias é de 0.95°C para a zona térmica ZT4 e de 1.63°C para a zona térmica ZT11;
- Relativamente à temperatura máxima, a solução que apresenta os valores mais elevados é a solução SE, de 23.56°C para a zona térmica ZT4 e de 25.90°C para a zona térmica ZT11. Estes valores encontram-se dentro dos níveis de conforto exigidos pelo regulamento nacional (25°C) e pela norma EN 15251 (sensivelmente entre 20°C a 28°C) não conduzindo a sobreaquecimento;
- Comparando as duas zonas térmicas, a zona pertencente ao r/c (ZT4) ostenta sempre valores de temperatura abaixo dos registados na zona ZT11, para todas as soluções. A partir deste resultado, analogamente à estação de aquecimento, observa-se a susceptibilidade da temperatura interior do piso mais elevado, à variação da temperatura exterior;
- A solução que apresenta a percentagem de desconforto térmico mais baixa é a solução SE, com 79.41% de tempo de desconforto para a zona térmica ZT4 e com apenas 27.49% de tempo de desconforto para a zona ZT11, isto é, 805 horas num total de 2928 horas;
- Relativamente à amplitude térmica, os maiores valores ocorrem para a zona térmica ZT11, para todas as soluções.

A partir do primeiro ponto percebe-se que, tal como foi visto para a estação de aquecimento, existe uma reduzida variabilidade na temperatura interior entre as diferentes soluções.

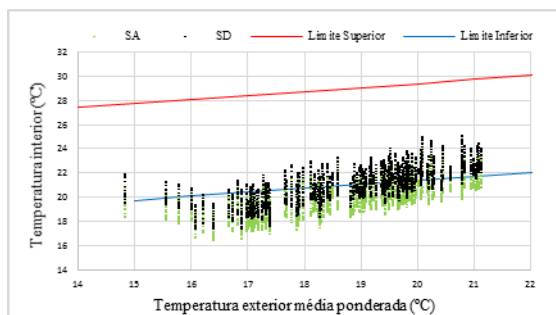
A análise do conforto térmico, segundo a norma EN 15251 (CEN, 2007) é apresentada na Figura 38 para a zona térmica ZT11 e na Figura 39 para a zona ZT4.



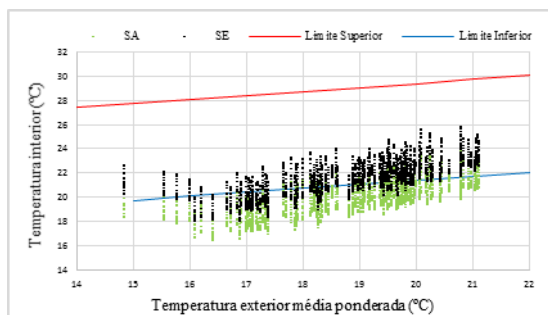
a) Confronto das soluções SA e SB



b) Confronto das soluções SA e SC

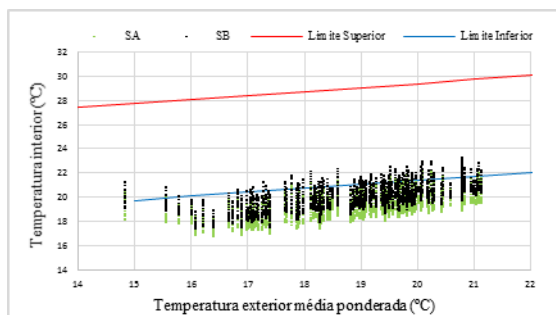


c) Confronto das soluções SA e SD

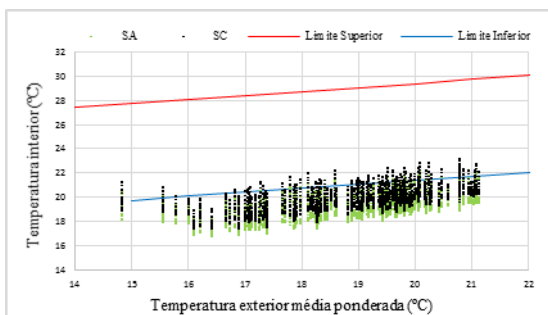


d) Confronto das soluções SA e SE

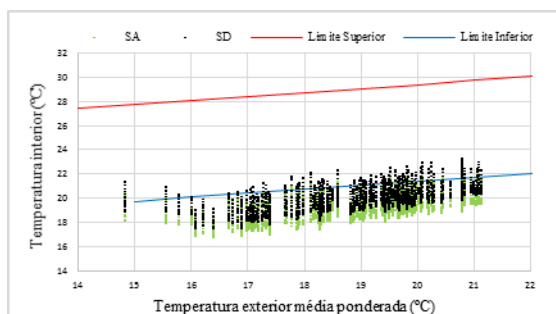
Figura 38 - Comparação do conforto térmico entre a solução SA e as restantes, na zona térmica ZT11, para a estação de arrefecimento.



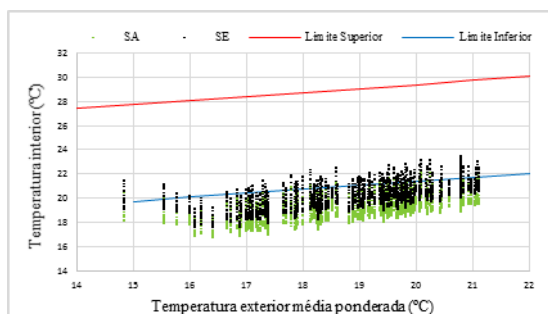
a) Confronto das soluções SA e SB



b) Confronto das soluções SA e SC



c) Confronto das soluções SA e SD



d) Confronto das soluções SA e SE

Figura 39 - Comparação do conforto térmico entre a solução SA e as restantes, para a zona térmica ZT4, para a estação de arrefecimento.

Através das Figuras 38 e 39, torna-se claro que o fenómeno de sobreaquecimento nunca se regista durante toda a estação de arrefecimento. Tal como acontece para a estação de aquecimento, a zona térmica do r/c apresenta amplitudes térmicas mais baixas que a zona pertencente ao 1º andar.

É claramente visível que a maior diferença de temperaturas acontece entre as soluções SA e SE, para ambas as zonas térmicas analisadas, como se vê na Figura 38 d) e Figura 39 d). É, também, possível observar que o registo de temperaturas de conforto para a estação de arrefecimento é apenas parcial, está dentro dos limites adaptativos para apenas parte do período do dia.

Todas as soluções construtivas apresentam melhores resultados em comparação à estação de aquecimento, tal como esperado, dada a elevada inércia térmica e baixa área fenestrada, o que resulta num maior período de tempo de conforto.

### **5.5.3.2. Análise das necessidades energéticas**

Igualmente ao que se observou para a solução original do caso de estudo (secção 5.4.3.), por não existir períodos de sobreaquecimento, não foram calculadas necessidades de arrefecimento.

## **5.6. Síntese**

### **5.6.1. Solução original do caso de estudo**

O edifício original apresenta um comportamento térmico muito semelhante para ambas as estações do ano, apresentando temperaturas interiores baixas.

Deste modo, o edifício não proporciona boas condições de conforto térmico interior na estação de aquecimento, apresentando uma temperatura média, cerca de 5°C inferior à temperatura de referência de conforto, 18°C, segundo o REH (DL n.º118/2013), que coincide com a temperatura mínima de conforto admitida pela norma EN 15251 (CEN, 2007). Consequentemente, o edifício apresenta uma elevadíssima percentagem de desconforto para as quatro zonas térmicas analisadas, entre 96% a 100%. Possivelmente este resultado deve-se à reduzida área envidraçada e simultaneamente ao grande volume

das zonas térmicas. A permeabilidade ao ar conferida pela caixilharia de madeira também poderá ter significativa influência.

Relativamente à estação de aquecimento, o facto de o edifício proporcionar temperaturas baixas não é totalmente desfavorável do ponto de vista do conforto térmico. As baixas temperaturas evidenciam a boa capacidade de inércia térmica conferida pelo adobe. Porém, segundo a norma EN 15251 (CEN, 2007), foi determinada uma percentagem de desconforto de cerca de 80% nas zonas térmicas pertencentes ao 1º andar e de cerca de 40% nas zonas térmicas pertencentes ao sótão.

Através deste estudo, foi ainda possível verificar o amortecimento da temperatura exterior, reflectindo-se na redução das amplitudes térmicas diárias da temperatura interior, principalmente no Verão. As zonas térmicas pertencentes ao piso mais elevado (sótão) apresentam uma amplitude térmica maior que as restantes.

### 5.6.2. Soluções construtivas da envolvente externa opaca

Com a introdução das diferentes soluções construtivas das paredes pertencente à envolvente opaca externa não são visíveis melhorias significativas do ponto de vista do comportamento térmico, concluindo-se que o comportamento térmico das diferentes soluções é muito idêntico entre si.

Na estação de aquecimento a solução construtiva com o melhor comportamento térmico é a solução SC constituída por um pano duplo de tijolo 30x15x8 com uma caixa-de-ar de 5cm, perfazendo uma espessura de parede de 38cm. Esta solução, de entre as analisadas, é a que apresenta menor valor do coeficiente de transmissão térmica, 1.15 W/m<sup>2</sup>.°C, o que justifica os melhores resultados do comportamento térmico em comparação com as restantes. A solução que apresentou o pior comportamento térmico foi a solução SA, correspondente ao caso de estudo. A diferença entre a percentagem de desconforto entre estas duas soluções é reduzida, sendo cerca de 2%, na zona ZT4, e cerca de 5% na zona ZT11. Consequentemente, a diferença entre as necessidades energéticas é de apenas cerca de 16 kWh/m<sup>2</sup>a.

Na estação de arrefecimento constata-se que a solução construtiva que apresenta o melhor comportamento térmico é a solução SE constituída por alvenaria de adobe (blocos de 41x30x12) no r/c e por um pano duplo de tijolo 30x15x8 no 1º andar e sótão. A



espessura das paredes do r/c é de 46cm, apresentando um coeficiente de transmissão térmica de  $1.71 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ , e as paredes dos pisos elevados têm espessura de 38cm, apresentando um coeficiente de transmissão térmica de  $1.15 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$  (igual à solução SC).

Nesta estação verifica-se uma maior diferença entre a percentagem de desconforto, sendo cerca de 17% para a zona ZT4 e cerca de 51% para a zona ZT11.

Todas as soluções construtivas apresentam melhores resultados para a estação de arrefecimento, o que era esperado, dada a elevada inércia térmica e baixa área fenestrada, o que resulta num maior período de tempo de conforto. Para além de que em nenhuma solução foram registadas temperaturas que provocassem o sobreaquecimento dos espaços.



## Capítulo 6

---

ESTRATÉGIAS DE REABILITAÇÃO TÉRMICA E ENERGÉTICA – ANÁLISE DO  
SEU DESEMPENHO

## **6. ESTRATÉGIAS DE REABILITAÇÃO TÉRMICA E ENERGÉTICA – ANÁLISE DO SEU DESEMPENHO**

6.1. Considerações gerais

6.2. Selecção das estratégias de reabilitação

6.3. Estudo de sensibilidade das estratégias

6.3.1. Estação de Aquecimento

6.3.2. Estação de Arrefecimento

6.3.3. Síntese

6.4. Análise comparativa entre a melhor estratégia de reabilitação e a solução original do caso de estudo – conforto térmico e desempenho energético

6.4.1. Estação de Aquecimento

6.4.1.1. Análise da temperatura interior

6.4.1.2. Análise do conforto térmico interior segundo a EN 15251

6.4.2. Estação de Arrefecimento

6.4.2.1. Análise da temperatura interior

6.4.2.2. Análise do conforto térmico interior segundo a EN 15251

6.4.3. Análise comparativa entre todas as estratégias

6.5. Síntese

## **6. ESTRATÉGIAS DE REABILITAÇÃO TÉRMICA E ENERGÉTICA – ANÁLISE DO SEU DESEMPENHO**

Neste capítulo são expostos e discutidos os resultados da análise das estratégias de reabilitação térmica e energética a aplicar ao caso de estudo, de modo a melhorar o seu comportamento térmico e energético, garantindo um nível de conforto superior e um menor consumo energético. Desta forma, tem-se em primeiro lugar, a definição das estratégias, seguida da análise que pretende mostrar a influência da variação dos parâmetros nos valores de temperatura interior. Posteriormente apresenta-se a análise comparativa entre a melhor estratégia e o comportamento da solução original do caso de estudo e uma estimativa do seu custo. Por fim, é feita a análise comparativa entre todas as estratégias simuladas, apresentando os respectivos valores do desconforto térmico e necessidades energéticas.

### **6.1. Considerações Gerais**

Assim como no capítulo anterior, o desenvolvimento do estudo de sensibilidade centra-se na temperatura do ar interior, sendo apresentados os resultados da temperatura interior, desconforto térmico segundo a Norma Europeia EN 15251 (CEN, 2007) e necessidades energéticas para a obtenção dos níveis de conforto estabelecidos pela norma, para a categoria III de conforto (edifícios existentes).

Para avaliar a influência da variação dos parâmetros seleccionados são apenas apresentados os resultados para uma zona térmica representativa, a zona térmica ZT11. Na análise comparativa entre a melhor estratégia e a solução original do caso de estudo são avaliadas as zonas térmicas ZT11 e ZT16, no 1º andar e no sótão, respectivamente.

### **6.2. Selecção das estratégias de reabilitação**

As estratégias de reabilitação consistiram em medidas passivas tendo sido considerados os seguintes três parâmetros influenciadores do conforto térmico e consumo energético:

- i) Colocação de isolamento térmico na envolvente exterior opaca;
- ii) Aplicação de um segundo envidraçado, através da redução do coeficiente de transmissão térmica ( $U_w$ ) e do factor solar ( $g_l$ );
- iii) Redução da taxa de ventilação.

A colocação do isolamento térmico tem como finalidade melhorar a resistência térmica da envolvente opaca, minimizando as perdas térmicas (no caso da estação de aquecimento), e os ganhos térmicos nefastos (no caso da estação de arrefecimento). Quando colocado pelo interior elimina a capacidade de inércia térmica conferida pelo adobe e reduz a área útil, no entanto, quando colocado pelo exterior pode descaracterizar arquitectonicamente o edifício, originando outros desafios de compatibilização em pontos singulares, como é o caso dos vãos, cornijas, entre outros. É de salientar que a colocação do isolamento térmico na envolvente exterior opaca apenas se coloca nas paredes exteriores e no pavimento que separa a zona habitável da não habitável (o r/c do 1º andar), pois o edifício original já apresentava isolamento térmico de 5 cm de espessura, na cobertura inclinada.

Optou-se pela colocação de um segundo envidraçado, constituindo assim uma janela dupla, para evitar a substituição dos caixilhos originais, descaracterizando arquitectonicamente o edifício. Esta acção tem o objectivo de melhorar as propriedades térmicas do envidraçado existente e contribuir para a estanquidade do ar.

Com a redução da taxa de ventilação pretende-se minimizar as perdas térmicas na estação de arrefecimento. Visto que o comportamento da solução original do caso de estudo na estação de arrefecimento é semelhante ao da estação de aquecimento, esta redução também deverá ser benéfica na estação de arrefecimento. Assim, estudou-se a variação da taxa de ventilação entre o valor da solução original do caso de estudo e o mínimo admissível definido no regulamento nacional (DL n.º118/2013), para as zonas habitáveis. Para a parte do desvão manteve-se a taxa de 5 renovações por hora.

Deste modo, realizaram-se 54 diferentes estratégias que resultaram da combinação destes parâmetros. Na Tabela 23 apresentam-se as variações dos parâmetros considerados no estudo.

Tabela 23 - Parâmetros considerados no estudo de sensibilidade.

Factores	Variações
Isolamento térmico na envolvente vertical exterior opaca e no pavimento do 1º andar	Pelo exterior (com 3cm, 5cm ou 8cm) Pelo interior (com 3cm, 5cm ou 8cm)
Coeficiente de transmissão térmica e factor solar do vidro	$U_w=3.3 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ e $g_{\perp}=0.6$ $U_w=2.6 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ e $g_{\perp}=0.48$ $U_w=1.7 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ e $g_{\perp}=0.4$
Taxa de ventilação	$0.4 \text{ h}^{-1}$ $0.6 \text{ h}^{-1}$ $1.0 \text{ h}^{-1}$

Na Figura 40, é apresentado o esquema em árvore que esquematiza as 54 estratégias de reabilitação, das quais apenas se simularam 24 estratégias, as que se encontram identificadas, por se considerarem representativas da amostra total de estratégias. As estratégias são identificadas pela designação do número de simulação (S#) e as que se encontram separadas por vírgulas, no fim de cada ramo da árvore esquemática, correspondem respectivamente à espessura de isolamento de 3cm, de 5cm e de 8cm.

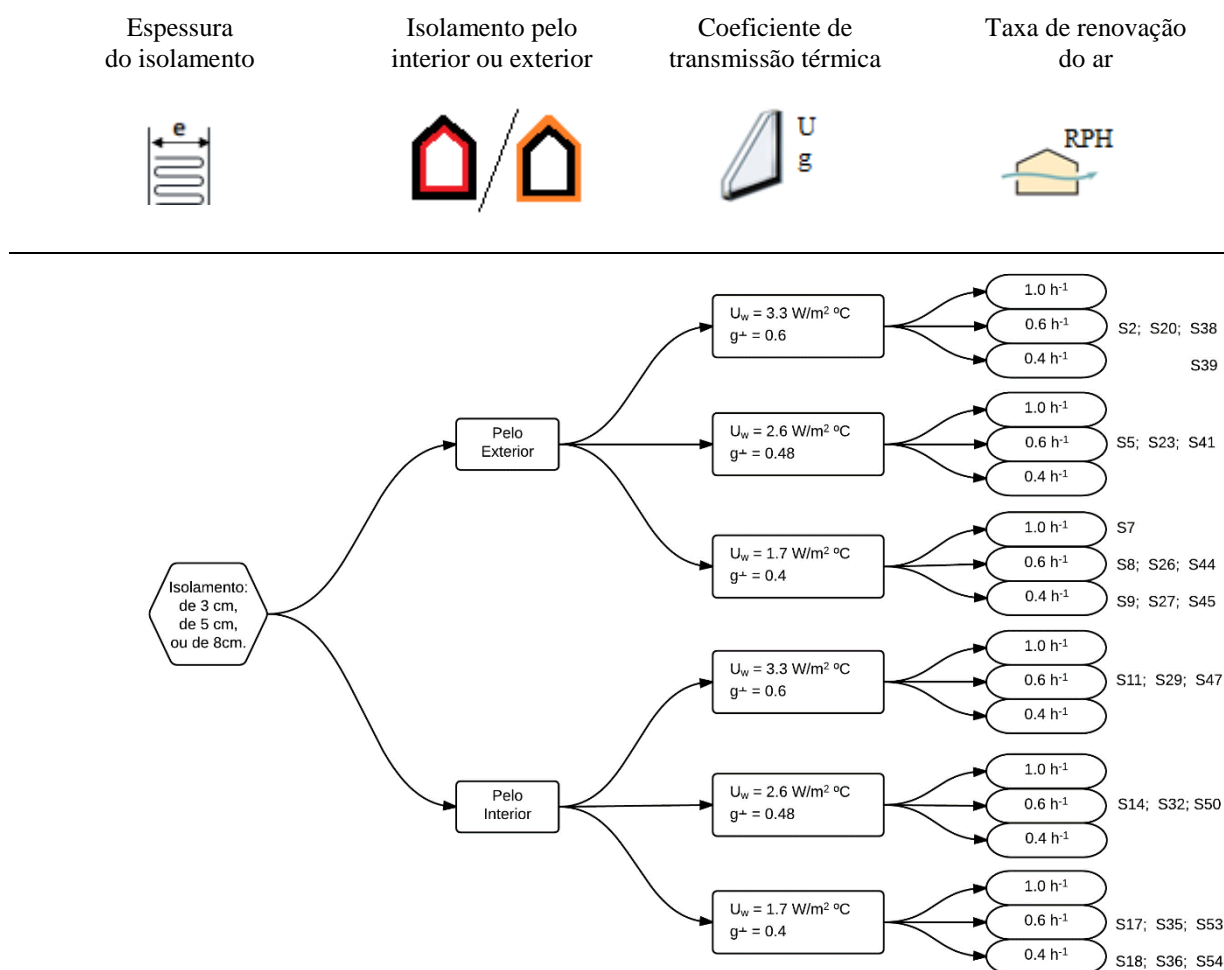


Figura 40 - Esquema em árvore com as estratégias de reabilitação.

Das 24 estratégias simuladas apenas serão analisadas e discutidas algumas no corpo da presente dissertação, com o objectivo de interpretar a influência da variação dos parâmetros sobre a temperatura interior, pois tabelas e gráficos com os resultados de todas as simulações e de todas as zonas térmicas tornaria a análise muito complexa e pouco clara. Os resultados da percentagem de tempo de desconforto térmico das estratégias simuladas, para todas as zonas térmicas habitáveis, encontram-se tabelados no Anexo B, com o objectivo de auxiliara a análise dos resultados. As estratégias escolhidas com o objectivo de interpretar a influência da variação dos parâmetros na temperatura interior, são as seguintes:

- S5 e S14 para a avaliação da influência da colocação do isolamento na envolvente externa vertical, pelo interior ou exterior;
- S5, S23 e S41 para a avaliação da influência da espessura do isolamento;
- S2, S5 e S8 para a avaliação da influência das propriedades térmicas das soluções envidraçados;
- S7, S8 e S9 para a avaliação da influência da taxa de renovação do ar.

Assim, será identificada a melhor estratégia de reabilitação e comparados os resultados com os resultados do comportamento térmico e energético da solução original do caso de estudo, apresentado no capítulo anterior.

## **6.3. Estudo de sensibilidade das estratégias**

### **6.3.1. Estação de Aquecimento**

A Tabela 24 apresenta os resultados que correspondem às oito estratégias seleccionadas e identificadas na secção anterior (6.2.), para a estação de aquecimento e para a zona térmica ZT11, nomeadamente a temperatura média e mínima interior, o desconforto térmico e as necessidades energéticas.



Tabela 24 - Temperatura interior e conforto térmico das estratégias S2, S5, S7, S8, S9, S14, S23 e S41, para a estação de aquecimento.

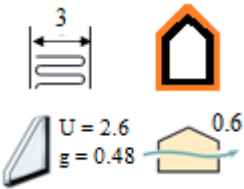
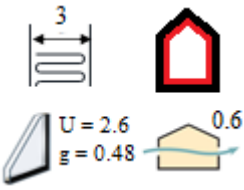
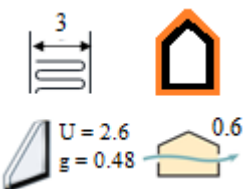
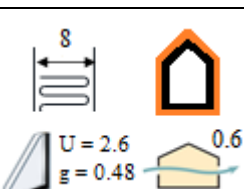
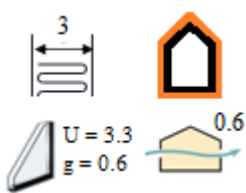
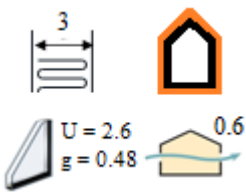
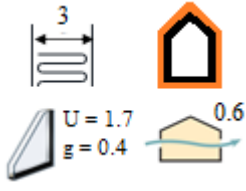
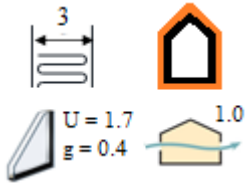
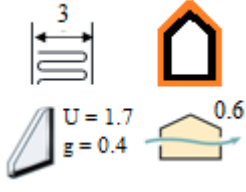
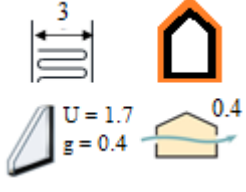
	Simulação	T. méd. (°C)	T. mín. (°C)	Desconforto (%)	Desconforto (h)	E (kWh/m²)
Colocação do isolamento	<b>S5</b> 	14.73 (6.25%)	10.14	91.23	4182	71.95
	<b>S14</b> 	14.68 (5.93%)	9.93	93.28	4276	71.98
Espessura do isolamento	<b>S5</b> 	14.73 (6.25%)	10.14	91.23	4182	71.95
	<b>S41</b> 	15.20 (9.14%)	10.58	84.45	3871	63.2

Tabela 24 - Continuação da apresentação temperatura interior e conforto térmico das estratégias S2, S5, S7, S8, S9, S14, S23 e S41, para a estação de aquecimento.

	Simulação	T. méd. (°C)	T. mín. (°C)	Desconforto (%)	Desconforto (h)	E (kWh/m²)
Vãos envidraçados	<b>S2</b> 	15.04 (8.18%)	10.32	88.02	4035	70.46
	<b>S5</b> 	14.73 (6.25%)	10.14	91.23	4182	71.95
	<b>S8</b> 	14.56 (5.15%)	10.08	93.08	4267	72.06
Taxa de renovação do ar	<b>S7</b> 	13.88 (0.50%)	9.01	96.95	4444	103.22
	<b>S8</b> 	14.56 (5.15%)	10.08	93.08	4267	72.06
	<b>S9</b> 	15.03 (8.12%)	10.80	88.44	4054	56.6

Nota: a percentagem que se encontra abaixo dos valores de temperatura média corresponde à melhoria destes, conferida pela estratégia, em relação à solução original do caso de estudo.

Através da análise dos resultados da Tabela 24 podem ser retiradas as seguintes conclusões:

- Comparando a estratégia S5 com a S8, cujo único parâmetro variável é o tipo de colocação do isolamento térmico, constata-se que a diferença entre temperaturas, desconforto térmico e necessidades energéticas é muito reduzida. A estratégia com isolamento pelo exterior é a que apresenta a maior temperatura média e mínima, e consequentemente, o menor desconforto térmico e necessidades energéticas;
- Através da comparação entre as estratégias S5 e S41, verifica-se que quanto maior a espessura, maior é a temperatura média e mínima, e consequentemente, menor é o tempo de desconforto térmico e as necessidades energéticas;
- A adopção de uma solução envidraçada com um coeficiente de transmissão térmico de  $1.7\text{W/m}^2\text{°C}$  e um factor solar de 0.4 resulta em valores de temperatura interiores mais baixos, logo um desconforto térmico maior e maiores necessidades energéticas. No entanto, a diferença entre o desconforto térmico causado por esta estratégia, estratégia S8, e o desconforto térmico causado pela estratégia com um coeficiente de transmissão térmico de  $3.3\text{W/m}^2\text{°C}$  e um factor solar de 0.6, estratégia S2, é apenas de aproximadamente 5%. O que corresponde a uma diferença entre as necessidades energéticas de  $1.6\text{kWh/m}^2\text{a}$ ;
- Quando se confere uma taxa de renovação do ar mais baixa ao edifício, este apresenta melhor comportamento térmico na estação em causa. Observa-se que a alteração da taxa de  $1.0\text{h}^{-1}$  para a taxa mínima admissível, de  $0.4\text{h}^{-1}$ , conduz a uma redução no desconforto térmico de 8.5% e a uma redução nas necessidades energéticas de aproximadamente  $47\text{kWh/m}^2\text{a}$ .

Como referido anteriormente, para tornar o corpo da tese o mais objectivo e claro possível, não se apresentaram os resultados de todas as simulações, nem para todas as zonas térmicas do edifício. No entanto, foram anexados os resultados relativos à percentagem de desconforto de todas as simulações e para todas as zonas térmicas habitáveis. Estes encontram-se tabelados no Anexo B, e analisando-os é possível

corroborar que, relativamente à influência do primeiro parâmetro, a colocação do isolamento pelo exterior conduz a um melhor comportamento térmico na estação de aquecimento, para todas as zonas térmicas do edifício.

Relativamente à solução envidraçada, constatou-se que introduzindo qualquer uma das três soluções é atingida uma temperatura média interior mais elevada relativamente à solução original do caso de estudo (percentagem de melhoria entre 5.15% a 8.18%). No entanto, de entre as três, a que conduz à maior temperatura média interior ( $15.04^{\circ}\text{C}$ ) é a que apresenta o valor mais alto do coeficiente de transmissão térmico,  $3.3\text{W/m}^2\text{^{\circ}C}$ , e o valor mais alto do factor solar, 0.6, isto é, a estratégia S2. Tal resultado deve-se, possivelmente, à reduzida área envidraçada do edifício e simultaneamente ao grande volume das zonas térmicas. Deste modo, conferindo uma maior resistência térmica ao envidraçado implica um valor mais baixo do factor solar, logo os ganhos solares passam a ser inferiores, fazendo com que a temperatura interior na zona térmica não atinja valores suficientemente altos de modo a contribuir para o conforto térmico. Contudo, relembra-se que esta diferença é muito reduzida, não excedendo  $0.5^{\circ}\text{C}$  entre a S2 e a S8.

As estratégias mais eficazes na melhoria da temperatura média interior, nomeadamente no seu aumento, são a S9, que garante uma taxa de renovação do ar de  $0.4\text{h}^{-1}$  (melhoria de 8.12%) e a S2, que consiste numa solução envidraçada com um coeficiente de transmissão térmico de  $3.3\text{W/m}^2\text{^{\circ}C}$  e um factor solar de 0.6 (melhoria de 8.18%).

### 6.3.2. Estação de Arrefecimento

A Tabela 25 apresenta os resultados respectivos à estação de arrefecimento, nomeadamente os valores de temperatura média e máxima interior, da amplitude térmica e do desconforto térmico. Não são apresentadas necessidades energéticas porque, tal como acontece no comportamento da solução original do caso de estudo, o edifício não sofre sobreaquecimento, não sendo relevante calcular necessidades energéticas de arrefecimento.

Tabela 25 - Temperatura interior, conforto térmico e amplitudes térmicas diárias das estratégias S2, S5, S7, S8, S9, S14, S23 e S41, para a zona térmica ZT11, para a estação de arrefecimento.

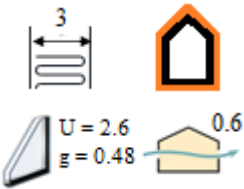
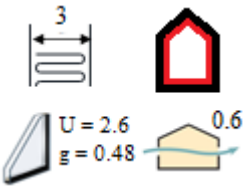
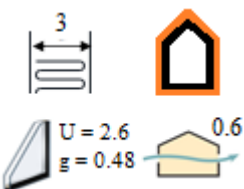
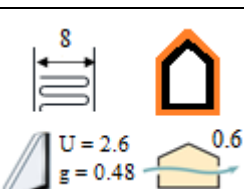
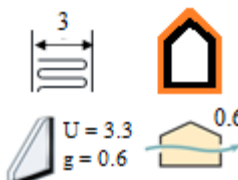
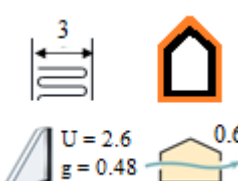
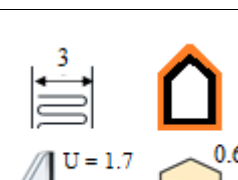
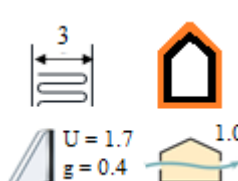
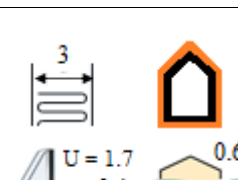

	Simulação	T. méd. (°C)	T. mín. (°C)	Desconforto (%)	Desconforto (h)	$\Delta T$ diária (°C)
Colocação do isolamento	<b>S5</b> 	20.89 (3.97%)	23.52	56.32	1649	1.61
	<b>S14</b> 	20.88 (3.93%)	23.80	55.36	1621	1.57
Espessura do isolamento	<b>S5</b> 	20.89 (3.97%)	23.52	56.32	1649	1.61
	<b>S41</b> 	21.38 (6.17%)	23.93	30.05	880	1.62

Tabela 25 – Continuação da apresentação da temperatura interior, conforto térmico e amplitudes térmicas diárias das estratégias S2, S5, S7, S8, S9, S14, S23 e S41, para a zona térmica ZT11, para a estação de arrefecimento.

	Simulação	T. méd. (°C)	T. mín. (°C)	Desconforto (%)	Desconforto (h)	$\Delta T$ diária (°C)
Vãos envidraçados	<b>S2</b> 	20.98 (4.38%)	23.66	51.26	1501	1.64
	<b>S5</b> 	20.89 (3.97%)	23.52	56.32	1649	1.61
	<b>S8</b> 	20.84 (3.74%)	23.39	59.94	1755	1.56
Taxa de renovação do ar	<b>S7</b> 	20.41 (1.71%)	23.59	72.98	2137	2.21
	<b>S8</b> 	20.84 (3.74%)	23.39	59.94	1755	1.56
	<b>S9</b> 	21.15 (5.15%)	23.31	39.62	1160	1.17

Nota: a percentagem que se encontra abaixo dos valores de temperatura média corresponde à melhoria destes, conferida pela estratégia, em relação à solução original do caso de estudo.

Através da análise dos resultados da Tabela 25 podem ser retiradas as seguintes conclusões:

- Os resultados não são conclusivos no que concerne à colocação do isolamento térmico, pois as duas estratégias apresentam valores muito similares;
- Com o aumento da espessura do isolamento o desconforto térmico reduz cerca de 26%. A diferença das temperaturas média e máxima é muito reduzida, sendo apenas de aproximadamente 0.5°C;
- A adopção de uma solução envidraçada com um coeficiente de transmissão térmico de 3.3W/m<sup>2</sup>.°C e um factor solar de 0.6 resulta num menor desconforto térmico. Porém, a diferença entre o desconforto térmico interior da estratégia, S2 e o da estratégia S8 é de apenas 8.68%. Ligeiramente mais elevada que a diferença observada para a estação de aquecimento. A diferença entre as temperaturas médias e as temperaturas máximas é de aproximadamente 0.2°C, entre a estratégia S2 e S8;
- Concluiu-se que reduzindo a taxa de ventilação de 1h<sup>-1</sup> para 0.4h<sup>-1</sup> é melhorado o conforto térmico em cerca de 33%, aumentando ligeiramente a temperatura média e reduzindo ligeiramente a temperatura máxima.

Como não foi possível concluir através da tabela, relativamente à colocação do isolamento térmico, recorreu-se ao auxílio da tabela que contém todos os resultados no Anexo B. A partir desta, verifica-se que o aumento da espessura do isolamento conduz em geral a uma maior diferença dos resultados. Constatando-se então, que para a espessura mais reduzida, de 3cm, não existe praticamente diferença entre a colocação do isolamento pelo interior e a colocação pelo exterior. Para as restantes espessuras de isolamento a colocação do isolamento pelo exterior apresenta melhores resultados em termos de temperatura interior e desconforto térmico. Verificando-se uma diferença entre a percentagem de desconforto obtida com o isolamento pelo interior e a percentagem de desconforto obtida com o isolamento pelo exterior, para a espessura de isolamento de 5cm, de apenas 1% (ZT11). E para a espessura de 8cm, esta diferença é de 3% (ZT11) (ver Anexo B).

Relativamente ao resultado obtido na análise da influência da taxa de renovação do ar, contrariamente ao esperado, verificou-se que quanto menor a taxa, mais baixa é a

percentagem de desconforto térmico. Neste caso em particular, estação de arrefecimento, seria de esperar que uma maior taxa de renovação do ar conduziria a benefícios, por dissipar o calor retido dentro do edifício. Porém, como se verificou na análise do comportamento da solução original do caso de estudo, o edifício não apresenta temperaturas que excedem o limite máximo de conforto térmico, não se observando portanto, sobreaquecimento. Tal faz com que a perda térmica seja prejudicial ao conforto, por provocar a descida da temperatura ainda mais abaixo do limite inferior de conforto térmico, segundo a norma EN 15251 (CEN, 2007).

Assim como na estação de aquecimento, também nesta estação todas as estratégias implicam melhorias da temperatura interior em relação à solução original do caso de estudo. As que conferem uma melhoria mais elevada são a S9, que garante uma taxa de renovação do ar de  $0.4h^{-1}$  (melhoria de 5.15%) e a S41, que consiste na colocação de isolamento com espessura de 8cm, colocado pelo exterior (melhoria de 6.17%).

### 6.3.3. Síntese

De uma forma geral, concluiu-se que a variação de qualquer um dos parâmetros analisados não conduz a diferenças significativas entre os resultados. Contudo, qualquer uma das estratégias simuladas conduz ao aumento da temperatura interior que a solução original do caso de estudo apresentou (Capítulo 5), melhorando os níveis de conforto térmico e reduzindo o consumo energético necessário.

A partir do que se concluiu para a estação de aquecimento, pode depreender-se que a estratégia de reabilitação que apresenta isolamento térmico pelo exterior, com maior espessura (8cm), uma solução envidraçada com um coeficiente de transmissão térmica de  $3.3W/m^2\cdot^{\circ}C$  e um factor solar de 0.6, bem como a menor taxa de renovação do ar,  $0.4h^{-1}$ , é o que apresentará melhor comportamento térmico de entre as estratégias projectadas. A estratégia que reúne estas condições é a S39, que não se encontra entre as 24 estratégias simuladas e apresentadas (secção 6.2.). Mas tendo em conta que é a que trará mais benefícios ao nível do desempenho térmico e energético da solução original do caso de estudo, esta estratégia é simulada, sendo feita a análise comparativa na secção seguinte.

Na estação de arrefecimento, a influência da variação dos parâmetros analisados é análoga à que se observou para a estação de aquecimento, à excepção da colocação do



isolamento térmico, uma vez que apenas se constata a sua influência para espessuras superiores a 5cm. O facto de se observar um comportamento muito semelhante ao observado na estação de aquecimento, pode ser explicado através do que se concluiu para o comportamento da solução original do caso de estudo, nesta estação. Tal deve-se à reduzida taxa de área envidraçada e à boa inércia térmica, conferida pelo adobe, não permitindo que as temperaturas interiores atinjam valores elevados, desta forma, não é observado o fenómeno de sobreaquecimento mas também é prejudicado o conforto térmico devido às temperaturas abaixo do limite inferior de conforto térmico, segundo a norma EN 15251 (CEN, 2007).

Assim, igualmente à estação de aquecimento, para a estação de arrefecimento, conclui-se que a melhor estratégia é aquela que reúne as condições da simulação S39.

#### **6.4. Análise comparativa entre a melhor estratégia de reabilitação e o caso de estudo original – conforto térmico e desempenho energético**

##### **6.4.1. Estação de Aquecimento**

###### **6.4.1.1. Análise da temperatura interior**

Na Figura 41 apresentam-se as temperaturas interiores da estratégia S39 e da solução original do caso de estudo (simulação), para as zonas térmicas ZT11 e ZT16 e para as duas semanas mais frias da estação (1 a 15 de Fevereiro). A recta horizontal de 18°C é a representativa da temperatura de referência de conforto, segundo o REH (DL n.º118/2013). Na tabela apresentada de seguida, Tabela 26, encontram-se sintetizados os resultados do estudo estatístico da temperatura interior.

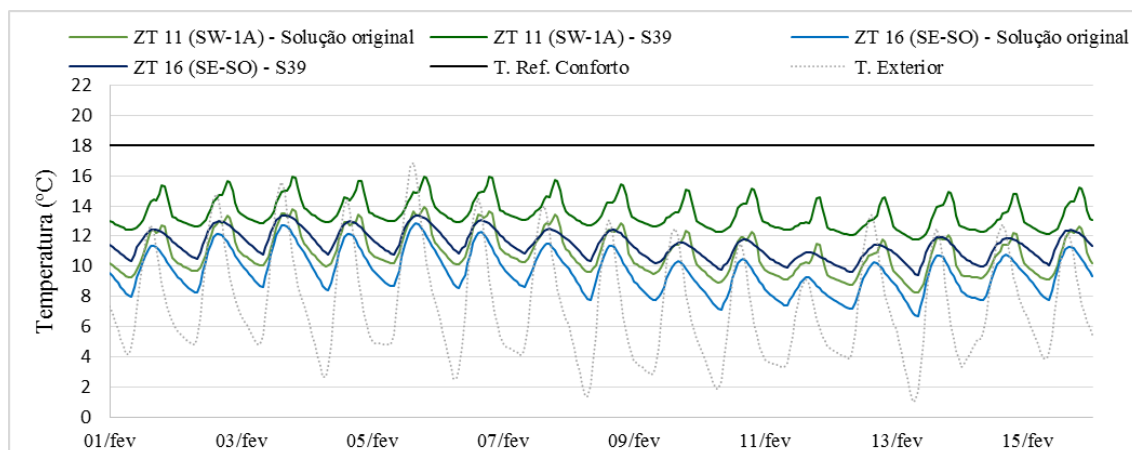


Figura 41 - Comparação da temperatura interior da estratégia S39 e da solução original do caso de estudo, para as zonas ZT11 e ZT16, de 1 a 15 de Fevereiro.

Tabela 26 - Análise estatística da temperatura interior da estratégia S39 e da solução original do caso de estudo, para a estação de aquecimento.

Simulação		Zona Térmica	T. méd. (°C)	T. mín. (°C)	Mediana (°C)	Desvio Padrão (°C)
Solução original		ZT11	13.81	8.27	13.28	2.79
		ZT16	12.88	6.66	12.31	3.13
S39		ZT11	16.24	11.74	15.50	2.77
		ZT16	14.53	9.40	13.91	2.98

Através da análise da Figura 41 e Tabela 26 conclui-se que após aplicar a melhor estratégia de intervenção é possível obter temperaturas interiores mais elevadas, e portanto, mais próximas da temperatura de conforto. Pela análise da Figura 41 constata-se que em certos períodos do dia a diferença entre a temperatura interior, na mesma zona térmica, chega a atingir 3°C. Observa-se que zonas térmicas no 1º andar têm curvas com comportamento semelhante, assim como as zonas térmicas do sótão. Relativamente à temperatura média, obtém-se uma diferença de 2.43°C para a ZT11, e de 1.65°C para a ZT16. Relativamente à temperatura mínima, a estratégia conduz ao aumento de 3.47°C na zona térmica ZT11 e de 2.74°C na zona térmica ZT16.

Nas Figuras 42 e 43 são apresentados os gráficos da probabilidade cumulativa da temperatura interior, para cada uma das zonas térmicas.

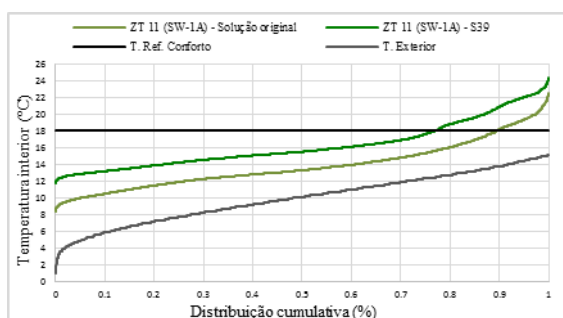


Figura 42 - Probabilidade cumulativa, para a zona ZT11, para a estação de aquecimento.

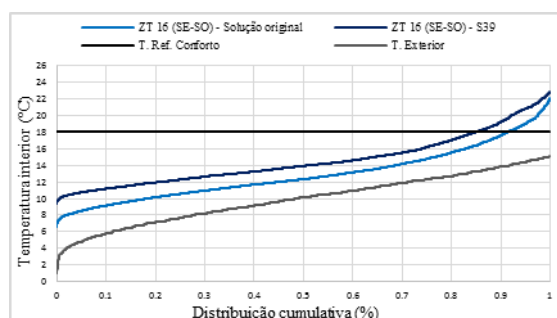


Figura 43 - Probabilidade cumulativa, para a zona ZT16, para a estação de aquecimento.

Através da Figura 42 e 43 observa-se a subida da temperatura mínima em cerca de 4°C, para a zona térmica ZT11, e cerca de 3°C para a zona térmica ZT16, enquanto a temperatura máxima sobe cerca de 2°C na zona ZT11 e cerca de 1°C na zona ZT16. Observa-se claramente que as curvas da estratégia S39 intersectam primeiro a recta representativa do conforto (18°C), apresentando a zona ZT11 menor percentagem de tempo de desconforto térmico, cerca de 75%, enquanto a solução original apresenta cerca de 90%. Contudo, esta estratégia ainda se encontra distante de proporcionar um valor aceitável, nomeadamente abaixo de 50% de desconforto.

#### 6.4.1.2. Análise do conforto térmico segundo a norma EN 15251

A temperatura mínima de conforto térmico, segundo a norma EN 15251, é de 18°C, e a análise segundo esta norma é apresentada nas Figuras 44 e 45. Na Tabela 27 apresentam-se os valores da percentagem de tempo de desconforto e respectivo número de horas.

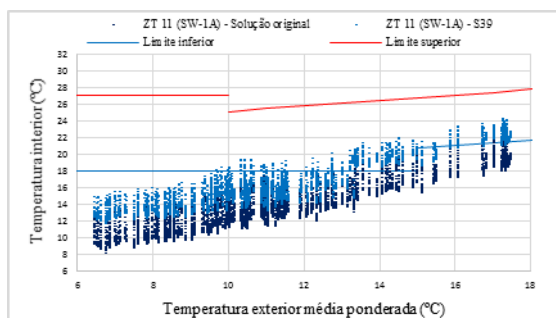


Figura 44 - Comparação da análise de conforto entre a estratégia S39 e a solução original do caso de estudo, segundo a EN15251, para a zona ZT11 e para a estação de aquecimento.

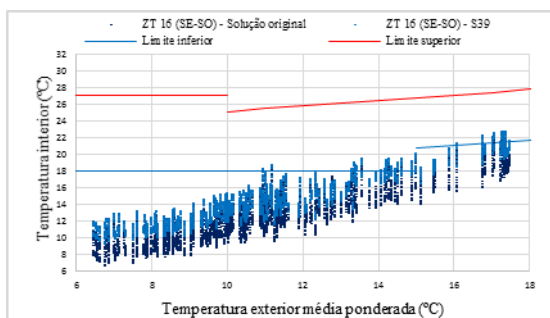


Figura 45 - Comparação da análise de conforto entre a estratégia S39 e a solução original do caso de estudo, segundo a EN15251, para a zona ZT16 e para a estação de aquecimento.

Tabela 27 - Tempo de desconforto térmico da estratégia S39 e da solução original do caso de estudo, para a estação de aquecimento.

Zona Térmica	Tempo de desconforto térmico (%)		Tempo de desconforto térmico (h)	
	Caso de Estudo	S39	Caso de Estudo	S39
ZT11 (SW – 1º Andar)	96.38	77.92	4418	3572
ZT16 (SE – Sótão)	96.95	89.03	4444	4081

A implementação da estratégia de reabilitação permite reduzir o desconforto térmico em 18.46% na zona térmica ZT11 e em apenas em 7.92% na zona térmica ZT16.

É possível visualizar esta subida significativa dos valores da temperatura interior, nas Figuras 44 e 45, que se apresentam como o resultado horário da simulação numérica para toda a estação de aquecimento.

A estratégia S39 só produz uma melhoria de 7.92% na zona térmica ZT16, mas tal não significa que não tenha também um elevado impacto nos valores de temperatura, como acontece para a zona térmica ZT11. Pois, esta zona, ZT16, ao apresentar temperaturas mais baixas no caso da solução original do caso de estudo, faz com que a subida de temperatura provocada pela implementação da estratégia, embora significativa, não seja suficiente para fazer com que atinja o limite inferior de conforto de modo a contribuir para uma maior percentagem de conforto. Assim, apenas se observam temperaturas dentro dos limites de conforto de forma pontual no caso das temperaturas exteriores mais elevadas (ver Figura 45).

### 6.4.1.3. Análise das necessidades energéticas

Nesta secção são expostos os resultados das necessidades energéticas, para a estação de aquecimento, para a obtenção da temperatura mínima de conforto segundo a norma europeia EN 15251 (18°C). Como foi explanado na secção 5.1., recorreu-se à simulação de um sistema de aquecimento HVAC que funciona de acordo com um intervalo de temperatura de referência. A Figura 46 apresenta as necessidades energéticas, quer para a solução original do caso de estudo, quer para a estratégia S39. A Figura 47 apresenta a percentagem de tempo de desconforto com as necessidades energéticas de ambos os casos. É de realçar que para a execução deste último gráfico a percentagem de desconforto diz respeito à média das zonas habitáveis que são as mesmas que se encontram sob o efeito do sistema de aquecimento.

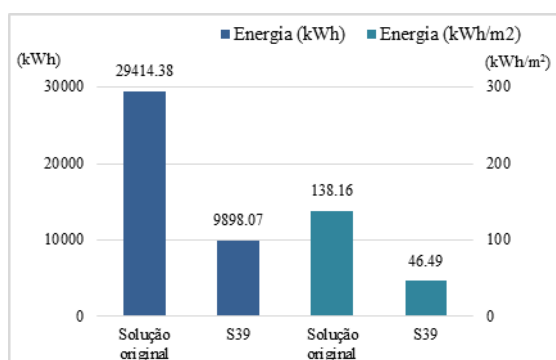


Figura 46 - Necessidades energéticas, para a estação de aquecimento.

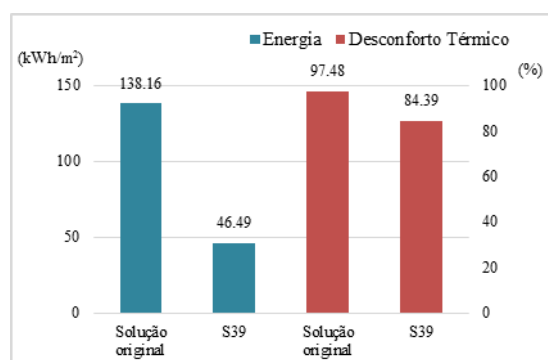


Figura 47 - Necessidades energéticas e desconforto térmico, para a estação de aquecimento.

A partir dos registos constata-se que a necessidade energética que o edifício requer para atingir o limite mínimo de conforto, caso seja implementada a estratégia S39, é significativamente mais baixa, sendo cerca de 46.49kWh/m²a. Ou seja, menos de metade da energia que a solução original necessita (138.16kWh/m²a).

Constata-se que apesar de a diferença entre a percentagem de desconforto da solução original do caso de estudo e a da estratégia ser apenas de aproximadamente 14%, a implementação da estratégia de reabilitação leva a um consumo de energia de aproximadamente 66% inferior ao que seria requerido pela solução original. Conclui-se portanto, que a estratégia S39 conduz a grandes benefícios no que respeita ao consumo energético.

#### 6.4.1.4. Estimativa do custo do consumo energético

A estratégia S39 consiste na colocação de isolamento térmico de 8cm pelo exterior e uma janela dupla pelo interior, com caixilharia de madeira. A estimativa do custo para esta intervenção é apresentada na Tabela 28.

Tabela 28 - Estimativa do custo da estratégia de intervenção S39.

Tarefa	Preço unitário (€/m <sup>2</sup> )	Área (m <sup>2</sup> )	Custo (€)	Total (€)
Colocação do sistema ETIC na envolvente opaca externa, pelo exterior, com XPS de 8cm	35	338.29	11840.15	22445.15
Colocação de um envidraçado com vidro duplo e caixilharia de madeira	350	30.3	10605	

Conclui-se que o investimento inicial para implementar esta intervenção ronda os 22500€. Tendo em conta que a solução original necessita de uma energia de 138.16kWh/m<sup>2</sup>a, que corresponde a 29414.38kWh, para que a temperatura interior se encontre dentro do intervalo de temperatura de conforto exigido pela regulamentação. E sabendo que a estratégia S39 apenas necessita de 46.49kWh/m<sup>2</sup>a, que corresponde a 9898.07kWh, constata-se que com a implementação da estratégia S39 o ocupante poupa o custo relativo à diferença, 91.67kWh/m<sup>2</sup>a que corresponde a 19516.31kWh.

Como o preço de 1kWh é 0.1528€ e o imposto sobre o valor acrescentado, IVA, é de 23.25%, constata-se que o custo associado aos 19516.31kWh é de 2982.09€, somando o IVA (693.34€) resulta um total de 3675.43€.

Assim, o retorno para o investimento inicial de 22445.15€ será de 6 anos e sensivelmente 1 mês (40 dias).

## 6.4.2. Estação de Arrefecimento

### 6.4.2.1. Análise da temperatura interior

Na Figura 48 apresenta-se a temperatura interior da estratégia S39 e da solução original do caso de estudo, para as zonas térmicas ZT11 e ZT16, para as duas semanas mais quentes (7 a 21 de Agosto). A recta horizontal de 25°C representa a temperatura de referência de conforto, segundo o REH (DL n.º118/2013). A Tabela 29 apresenta a análise estatística da temperatura interior, enquanto as Figuras 49 e 50 contêm os gráficos da probabilidade cumulativa da temperatura interior destes dois casos.

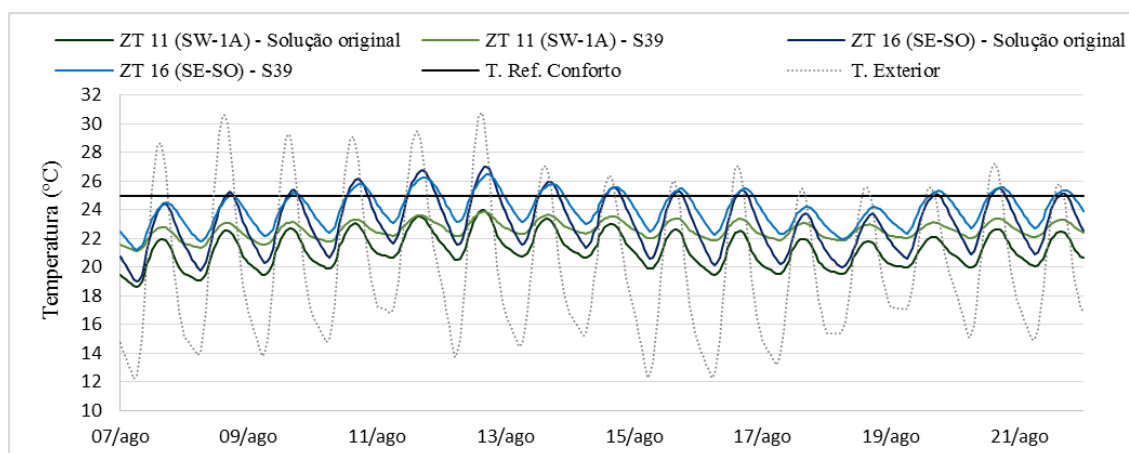
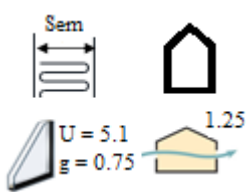
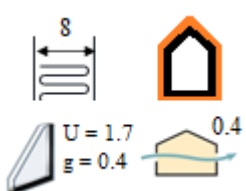


Figura 48 - Gráfico das temperaturas interiores da estratégia S39 e do caso de estudo, para as zonas ZT11 e ZT16, de 7 a 21 de Agosto.

Tabela 29 - Análise estatística da temperatura interior da estratégia S39 e da solução do caso de estudo, para a estação de arrefecimento.

Simulação		Zona	T. méd. (°C)	T. máx. (°C)	Mediana (°C)	Desvio Padrão (°C)	$\Delta T$ diária (°C)
<b>Solução original</b>		ZT11	20.06	24.00	20.06	1.39	2.62
		ZT16	21.73	27.29	21.67	1.98	4.33
<b>S39</b>		ZT11	21.71	23.90	21.73	0.83	1.07
		ZT16	22.89	26.65	22.87	1.40	2.11

A partir da análise da Figura 48 e da Tabela 29 constata-se que a diferença entre a temperatura média da solução original do caso de estudo e da estratégia S39 é de 1.65°C para a zona ZT11 e de 1.16°C para a zona ZT16. Contudo, analisando a Figura 48, verifica-se que em certos períodos do dia a diferença entre as temperaturas interiores, na mesma zona térmica, difere aproximadamente 2°C a 205°C, sendo esta diferença mais reduzida em comparação com a estação de aquecimento.

Para além desta última conclusão, a estratégia S39 conduz à redução da temperatura máxima na zona ZT11 em apenas 0.1°C, enquanto na zona ZT16 reduz a temperatura máxima em 0.64°C. No entanto, a amplitude térmica diária baixa significativamente porque esta estratégia, tal como aconteceu para a estação de aquecimento, permite elevar os valores de temperatura mínima. Regista-se uma redução da amplitude térmica diária de 1.55°C para a zona térmica ZT11 e de 2.22°C para a zona térmica ZT16.

Nas Figuras 49 e 50 são apresentados os gráficos da probabilidade cumulativa da temperatura interior, para cada uma das zonas térmicas.



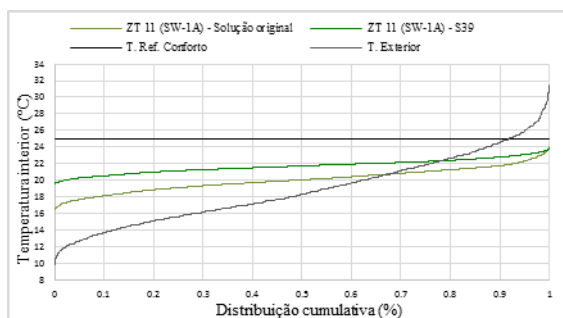


Figura 49 - Probabilidade cumulativa, para a zona ZT11, para a estação de arrefecimento.

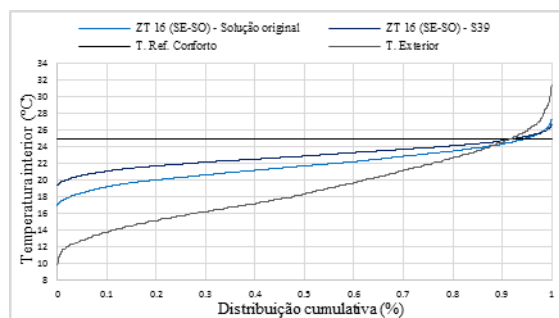


Figura 50 - Probabilidade cumulativa, para a zona ZT16, para a estação de arrefecimento.

Através das figuras da probabilidade cumulativa verifica-se a maior diferença de temperaturas na zona térmica ZT11, assim como a significativa subida da temperatura mínima e reduzida diferença entre as temperaturas máximas. Este comportamento é semelhante ao observado para a estação de aquecimento, o que faz sentido porque a estratégia é a mesma, a S39, como foi explicado na secção 6.3.3.

É ainda possível constatar, pela análise da Figura 49, que as curvas, quer da solução original do caso de estudo, quer da estratégia S39, para a zona térmica ZT11, nunca intersectam a recta representativa do conforto para esta estação (25°C), não apresentando por isso nenhuma percentagem de tempo de conforto térmico, nem existência de sobreaquecimento.

#### 6.4.2.2. Análise do conforto térmico segundo a norma EN 15251

Nas Figuras 51 e 52 é apresentada a análise de conforto térmico, para cada zona térmica analisada, ZT11 e ZT16, respectivamente. Na Tabela 30 encontram-se os valores da percentagem de tempo de desconforto e respectivo número de horas.

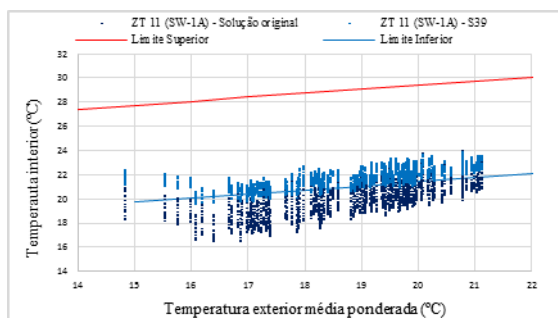


Figura 51 - Comparação da análise de conforto entre a estratégia S39 e a solução original do caso de estudo, segundo a EN15251, para a zona ZT11, para a estação de arrefecimento.

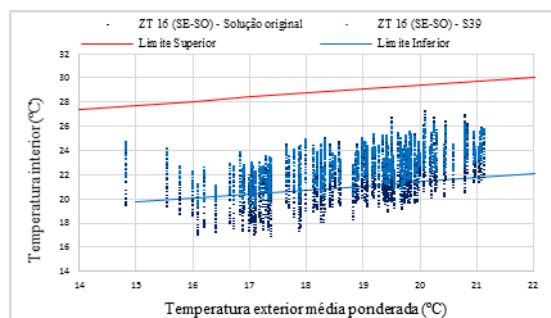


Figura 52 - Comparação da análise de conforto entre a estratégia S39 e a solução original do caso de estudo, segundo a EN15251, para a zona ZT16, para a estação de arrefecimento.

Tabela 30 - Tempo de desconforto térmico da estratégia S39 e da solução original do caso de estudo, para a estação de arrefecimento.

Zona Térmica	Tempo de desconforto térmico (%)		Tempo de desconforto térmico (h)	
	Caso de Estudo	S39	Caso de Estudo	S39
ZT11 (SW - 1ºAndar)	78.21	12.91	2290	378
ZT16 (SE - Sótão)	36.68	5.19	1074	152

A implementação da estratégia de reabilitação permite reduzir o desconforto térmico na estação de arrefecimento em 65.30% para a zona ZT11 e em 31.49% para a zona ZT16.

A partir das Figuras 51 e 52 é notória a subida significativa dos valores da temperatura interior com a implementação da estratégia, concluindo-se que esta, na estação de arrefecimento, é bastante eficaz.

A partir desta abordagem de avaliação adaptativa, pela norma EN 15251 (CEN, 2007), a subida das temperaturas contribui consideravelmente para o conforto térmico, contrariamente ao que foi visto segundo a abordagem pelo regulamento nacional (DL n.º118/2013), na secção anterior. Segundo o regulamento nacional não era atingido o conforto térmico pois a temperatura interior nunca atingiu os 25°C.

### 6.4.3. Análise comparativa entre todas as estratégias

A análise comparativa entre os resultados de desconforto térmico e necessidades energéticas, entre todas as estratégias, é feita apenas para a estação de aquecimento pois na estação de arrefecimento não existe sobreaquecimento, não sendo necessário a utilização de sistemas para arrefecimento que utilizariam o recurso energético. Na Figura 53 apresentam-se as 24 estratégias que foram simuladas, bem como a estratégia S39, com os

respectivos valores de desconforto térmico e necessidades energética. Estes valores foram determinados para as zonas habitáveis. A figura encontra-se dividida por zonas que indicam as estratégias que recorrem às diferentes taxas de renovação por hora (RPH) do ar. A zona correspondente à taxa de  $0.4\text{h}^{-1}$  foi subdividida em três zonas que indicam qual a espessura do isolamento que a estratégia dentro dessa zona utiliza (I #).

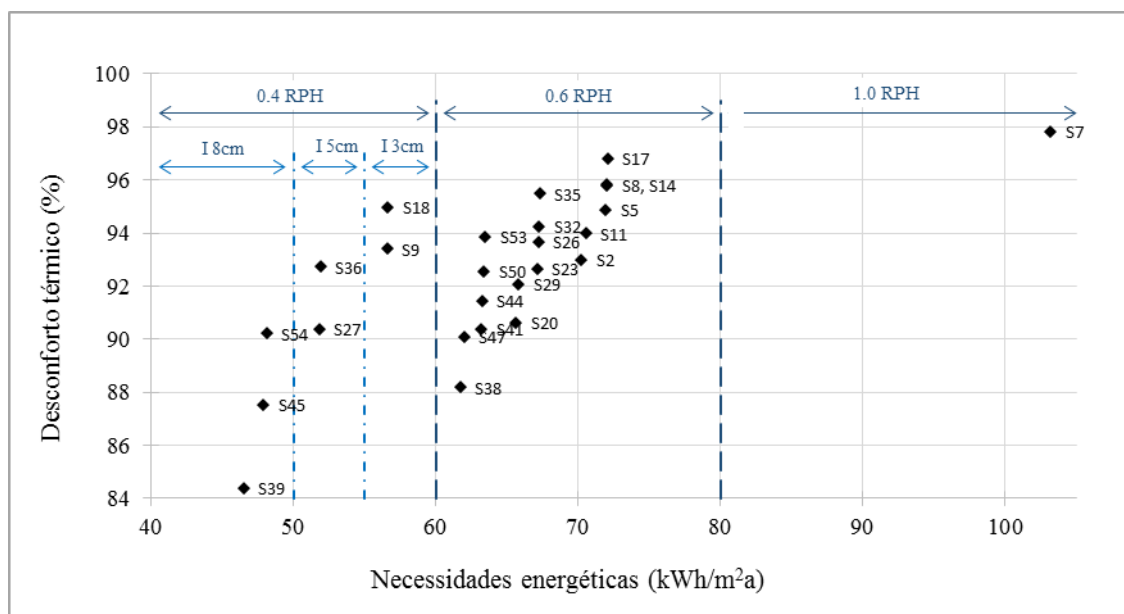


Figura 53 - Análise comparativa das estratégias de reabilitação simuladas.

Através da análise da Figura 53 e recorrendo ao auxílio do esquema em árvore que se encontra na secção 6.2., é possível constatar o seguinte:

- Em geral, evidencia-se o elevado desconforto térmico que o edifício ainda apresenta com a implementação das estratégias seleccionada (84% a 98%);
- A estratégia que revela o melhor resultado é a S39, que utiliza isolamento térmico de 8cm, colocado pelo exterior, envidraçados com um coeficiente de transmissão térmico de  $3.3\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$  e um factor solar de 0.6 e uma taxa de renovação do ar de  $0.4\text{h}^{-1}$ ;
- A estratégia que revela o pior resultado é a S7, que utiliza isolamento de 3cm, colocado pelo exterior, envidraçados com um coeficiente de transmissão térmico de  $1.7\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$  e um factor solar de 0.4, sendo a única, de entre as simuladas, que recorre à taxa de renovação do ar de  $1\text{h}^{-1}$ ;

- As necessidades energéticas diminuem com a diminuição da taxa de renovação do ar, sendo as estratégias que garantem uma taxa de  $0.4h^{-1}$  as que apresentam necessidades energéticas mais reduzidas. E também diminuem com o aumento da espessura do isolamento térmico, sendo este acontecimento observável para a taxa de renovação do ar de  $0.4h^{-1}$  e de  $0.6h^{-1}$ , o que pressupõe que para a taxa de  $1.0h^{-1}$  se suceda o mesmo;
- Observa-se ainda que existem estratégias que apresentam maiores valores de desconforto térmico, como as estratégias S54, S27, S36, S9 e S18, mas necessitam de menos energia que outras cuja percentagem de desconforto é menor, como as estratégias S38, S47, S41 e S20, por exemplo.

Na Figura não se encontra a solução original do caso de estudo, mas sabendo que este apresenta um desconforto térmico interior de 97.48% e necessidades energéticas de  $138.16kWh/m^2a$ , pode depreender-se que esta se situaria à direita da estratégia que apresenta o pior resultado (S7). É de relembrar que a solução original apresenta uma taxa de ventilação de  $1.25h^{-1}$  e não contém isolamento térmico nas paredes da envolvente opaca externa.

## 6.5.Síntese

Através da análise comparativa entre a melhor estratégia e a solução original do caso de estudo, concluiu-se que com implementação da estratégia S39 é obtido um desconforto térmico mais baixo 18.46% para a zona ZT11 e 7.92% para a zona ZT16. Consequentemente, o edifício requer um menor consumo de energia para aquecimento, sendo este de apenas  $46.49kWh/m^2a$ , quando a solução original requer  $138.16kWh/m^2a$ .

Para a estação de arrefecimento obtém-se um desconforto térmico 65.30% inferior ao registado para a solução original, para a zona ZT11, e 31.49% inferior ao registado para a solução original, para a zona ZT16.

Segundo a estimativa realizada para a implementação desta estratégia constatou-se que esta necessita de um investimento inicial que ronda os 22500€, apresentando um retorno de 6 anos e 40 dias. Pois o consumo que é poupado em relação à solução original do caso de estudo é de  $91.67kWh/m^2a$ , o que corresponde a  $19516.31kWh$ .

# Capítulo 7

CONSIDERAÇÕES FINAIS

## **7. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

7.1. Comportamento do caso de estudo

7.2. Comportamento das soluções construtivas de paredes exteriores

7.3. Estratégias de reabilitação térmica e energética

7.4. Simulação dinâmica

7.5. Norma Europeia EN 15251

7.6. Perspectivas de trabalhos futuros

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em Portugal existe um vasto património construído em alvenaria de adobe, localizado essencialmente na zona litoral centro. Devido ao acentuado estado de degradação que grande parte deste património apresenta, foi crescendo a necessidade da sua reabilitação. E devido ao reconhecimento das suas vantagens, como material e solução sustentável, economicamente viável e ecológico, bem como material com uma elevada capacidade de inércia térmica, foi crescendo o interesse pela sua protecção e valorização.

É, assim, fundamental estudar estratégias de reabilitação tendo em conta o conforto térmico e a eficiência energética. Desta forma, foi construído um modelo numérico representativo de um edifício de adobe construído no século XIX, por forma a desenvolver e simular diversas estratégias de reabilitação térmica e energética, com o objectivo de melhorar o comportamento e conforto térmico interior do caso de estudo.

A partir deste modelo numérico foi também estudado o impacto que a evolução do sistema construtivo das paredes exteriores em adobe produziu em termos térmicos e energéticos. Esta evolução do sistema construtivo verificou-se na primeira metade do século XX, devido ao surgimento das indústrias dos cimentos e tijolo cerâmico, bem como ao aparecimento e introdução do sistema porticado de betão armado.

As diversas estratégias de reabilitação simuladas consistiram em medidas passivas, tendo-se variado os seguintes parâmetros:

- iv) Colocação de isolamento térmico pelo interior ou pelo exterior, com diferentes espessuras (3, 5 e 8cm);
- v) Colocação de uma solução de janela dupla, variando as propriedades térmicas, nomeadamente o coeficiente de transmissão térmica (3.6, 2.6 e 1.7 W/m<sup>2</sup>°C) e o factor solar (0.6, 0.48, 0.4);
- vi) Redução da taxa de ventilação (1.0, 0.6, 0.4h<sup>-1</sup>).

A análise centrou-se no conforto térmico e baseou-se no modelo adaptativo da Norma Europeia EN 15251 (CEN, 2007) para edifícios existentes e não climatizados, ou seja, de categoria III, e na determinação das necessidades energéticas associadas.

## 7.1. Comportamento do caso de estudo

Para a realização da análise do comportamento térmico e energético do caso de estudo foi necessário validar o modelo numérico através do confronto entre os valores da temperatura interior obtidos pela medição *in situ* e os valores de temperatura interior obtidos por simulação numérica. Tendo em conta que não existe nenhuma norma, regra, que defina se o modelo se encontra validado, considerou-se que este se encontrava validado por apresentar uma diferença entre a temperatura média interior obtida pela medição *in situ* e a temperatura média interior obtida pela simulação, para um intervalo de oito dias, inferior a 0.4°C.

Após validado e extraídos os resultados, foi possível concluir que o comportamento térmico do edifício em estudo é muito semelhante para ambas as estações do ano, apresentando temperaturas interiores baixas. Deste modo, o edifício não proporciona boas condições de conforto térmico interior na estação de aquecimento, apresentando uma temperatura média, cerca de 5°C inferior à temperatura de referência de conforto, 18°C, segundo o REH (DL n.º118/2013), que coincide com a temperatura mínima de conforto admitida pela norma EN 15251 (CEN, 2007). Consequentemente, o edifício apresenta uma elevadíssima percentagem de desconforto, para as quatro zonas térmicas analisadas, entre 96% a 100%. Este resultado deve-se à reduzida área envidraçada e simultaneamente ao grande volume das zonas térmicas. A permeabilidade ao ar conferida pela caixilharia de madeira também tem influência.

Relativamente à estação de arrefecimento, o facto de o edifício proporcionar temperaturas baixas não é totalmente desfavorável do ponto de vista do conforto térmico. As baixas temperaturas evidenciam a boa capacidade de inércia térmica conferida pelo adobe, que é um material “de mudança de fase” natural, *Phase Change Material* (PCM), ou seja, um material que tem a capacidade de armazenar calor quando muda de fase, de sólido para líquido, devido ao aumento da temperatura do meio ambiente. E de libertar esse calor quando passa do estado líquido para o estado sólido, devido à redução da temperatura do meio ambiente (Soares *et al.*, 2013). Tal acontece porque o adobe contém uma certa quantidade de água na sua constituição em equilíbrio com o vapor de água no ar. Esta característica higroscópica da terra explica a razão de uma parede de terra desempenhar o papel de ar-condicionado natural proporcionando um ambiente interior saudável (Fontaine & Anger, 2009).



O facto de o edifício proporcionar temperaturas baixas não é totalmente desfavorável do ponto de vista do conforto térmico, porém, segundo a norma EN 15251 (CEN, 2007), foi determinada uma percentagem de desconforto de cerca de 80% para as zonas térmicas pertencentes ao 1º andar e de cerca de 40% para as zonas térmicas pertencentes ao sótão. Concluindo-se que a norma não se encontra bem adaptada à avaliação do conforto térmico na estação de arrefecimento, pois a esta percentagem de tempo de desconforto estão associadas temperaturas entre 18°C a 20°C, o que não se considera muito realista.

## **7.2. Comportamento das soluções construtivas de paredes exteriores**

Através da análise das diferentes soluções construtivas das paredes exteriores que se verificaram na primeira metade do século XX, concluiu-se que o comportamento térmico e energético do edifício permanece idêntico ao comportamento da solução original do caso de estudo. Ou seja, embora a introdução de materiais de tecnologia mais recente tenha proporcionado a introdução do tijolo cerâmico, no sistema construtivo, que apresenta um valor mais baixo de condutibilidade térmica, tal não se traduz numa melhoria significativa do comportamento térmico nas duas estações, independentemente de a solução apresentar um único pano de alvenaria de tijolo ou um pano duplo.

Constatou-se que, para a estação de aquecimento a solução construtiva que apresenta melhores resultados foi a solução SC, constituída por um pano duplo de tijolo 30x15x8 com uma caixa-de-ar de 5cm, perfazendo uma espessura de parede de 38cm. Esta solução, de entre as analisadas, é a que apresentava menor valor do coeficiente de transmissão térmica, 1.15 W/m<sup>2</sup>·°C, o que justifica os melhores resultados do comportamento térmico em comparação com as restantes.

No entanto, como foi referido, os resultados encontram-se próximos do comportamento da solução original do caso de estudo, existindo uma diferença de apenas cerca de 0.5°C na zona térmica ZT4 e cerca de 0.9°C na zona térmica ZT11, entre estas soluções. Consequentemente, a diferença entre a percentagem de desconforto também é reduzida, sendo cerca de 2% na zona ZT4 e cerca de 5% na zona ZT11. A diferença entre a necessidade energética requerida é de aproximadamente 16 kWh/m<sup>2</sup>a.

Para a estação de arrefecimento concluiu-se que a solução que apresentou melhores resultados foi a solução SE, que consiste numa solução híbrida, sendo construída por alvenaria de adobe (blocos de 41x30x12) no r/c e por um pano duplo de tijolo 30x15x8 no

1º andar e sótão. A espessura das paredes do r/c é de 46cm, apresentando um coeficiente de transmissão térmica de  $1.71 \text{ W/m}^2\text{°C}$ , e as paredes dos pisos elevados têm espessura de 38cm, apresentando um coeficiente de transmissão térmica de  $1.15 \text{ W/m}^2\text{°C}$  (igual à solução SC).

Esta solução apresentou melhores resultados na estação de arrefecimento porque, para além de apresentar o valor do coeficiente de transmissão térmico mais baixo das paredes dos pisos elevados (sujeitos a maiores amplitudes térmicas), também apresenta paredes de adobe no r/c, cujo benefício já é conhecido para a estação em causa. A inércia térmica conferida pelas paredes em adobe ajuda a manter a temperatura interior quando a temperatura exterior arrefece durante o período nocturno. Constatou-se uma diferença entre as temperaturas médias de  $0.95\text{°C}$ , para a zona térmica ZT4, e de  $1.63\text{°C}$ , para a zona térmica ZT11. Nesta estação verifica-se uma maior diferença entre a percentagem de desconforto, sendo cerca de 17% na zona ZT4 e cerca de 51% na zona ZT11.

Para esta estação, tal como se concluiu para a solução original do caso de estudo, não se registou sobreaquecimento em todas as soluções analisadas. Concluindo-se, por fim, que todas as soluções construtivas apresentam melhores resultados para esta estação, o que era esperado, dada a elevada inércia térmica e baixa área fenestrada, o que resulta num maior período de tempo de conforto, segundo a EN 15251 (CEN, 2007).

### **7.3. Estratégias de reabilitação térmica e energética**

De modo a perceber qual a estratégia a implementar que traria melhores resultados a nível térmico e energético foi realizado um estudo paramétrico. Este teve como objectivo compreender a influência da variação dos parâmetros seleccionados, em cada estação do ano, aquecimento e arrefecimento. Os parâmetros são os seguintes:

- i) Colocação de isolamento térmico pelo interior ou pelo exterior, com diferentes espessuras (3, 5 e 8cm);
- ii) Colocação de uma solução de janela dupla, variando as propriedades térmicas, nomeadamente o coeficiente de transmissão térmica ( $3.6$ ,  $2.6$  e  $1.7 \text{ W/m}^2\text{°C}$ ) e o factor solar ( $0.6$ ,  $0.48$ ,  $0.4$ );
- iii) Redução da taxa de ventilação ( $1.0$ ,  $0.6$ ,  $0.4\text{h}^{-1}$ ).

Com este estudo foi possível concluir que a influência de todos os parâmetros analisados é semelhante para ambas as estações, à excepção da colocação do isolamento térmico, uma vez que apenas se constata a sua influência para espessuras superiores a 5cm, na estação de arrefecimento.

Este comportamento semelhante entre ambas as estações é observável, porque, como na estação de arrefecimento as temperaturas interiores são muito baixas, um maior nível de conforto é atingido quando a influencia dos parâmetros provoca um aumento de temperatura, ou seja, igualmente ao que acontece para a estação de aquecimento. O facto de as temperaturas interiores serem baixas na estação de arrefecimento pode ser explicado através do que se concluiu para o comportamento da solução original do caso de estudo. A inércia térmica, conferida pelo adobe, não permite que as temperaturas interiores atinjam valores elevados, não se observando o fenómeno de sobreaquecimento e mantendo baixas as temperaturas interiores.

Relativamente à avaliação individual de cada parâmetro, constatou-se o seguinte:

- A colocação do isolamento na envolvente externa vertical pelo exterior produz melhores resultados que a colocação pelo interior para ambas as estações. Contudo, na estação de arrefecimento, apenas se constata esta sua influência para espessuras superiores a 5cm;
- A utilização de uma maior espessura do isolamento contribui para uma resistência térmica da envolvente mais elevada, evitando as perdas térmicas na estação de aquecimento e, para este caso de estudo, também na estação de arrefecimento. Uma maior espessura não permite que a temperatura interior seja tão susceptível à variação da temperatura exterior, para ambas as estações;
- A diferença entre a utilização das diferentes soluções envidraçadas é muito reduzida, para ambas as estações. Constatou-se que a solução envidraçada com um coeficiente de transmissão térmica de  $3.3\text{W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$  e um factor solar de 0.6, permitem obter uma temperatura interior ligeiramente maior que as soluções envidraçadas com os valores, das suas características térmicas, mais baixos;
- A existência de uma taxa de renovação do ar mais baixa, nomeadamente a de  $0.4\text{h}^{-1}$ , conduz a melhores resultados, pois previne uma maior dissipação do

calor, o que contribui para que a temperatura interior se mantenha dentro dos limites de conforto, para ambas as estações.

Apesar da pequena diferença que se observou entre a variação dos parâmetros analisados, qualquer uma das estratégias simuladas implicam melhorias da temperatura interior, logo no nível de conforto térmico, em relação à solução original do caso de estudo, para ambas as estações. Concluiu-se que as estratégias mais eficazes na melhoria da temperatura média interior para a estação de aquecimento foram as seguintes:

- A estratégia S9 que garante uma taxa de renovação do ar de  $0.4h^{-1}$ , conferindo uma melhoria de 8.12%;
- A estratégia S2 que consiste numa solução envidraçada com um coeficiente de transmissão térmico de  $3.3W/m^2\ ^\circ C$  e um factor solar de 0.6, conferindo uma melhoria de 8.18%.

Para a estação de arrefecimento, as estratégias mais eficazes na melhoria da temperatura média interior foram as seguintes:

- A estratégia S9 que garante uma taxa de renovação do ar de  $0.4h^{-1}$ , conferindo uma melhoria de 5.15%;
- A estratégia S41 que consiste na colocação de isolamento com espessura de 8cm, colocado pelo exterior, conferindo uma melhoria de 6.17%.

A partir do constatado através do estudo paramétrico realizado para ambas as estações, concluiu-se que a estratégia que resultaria num melhor comportamento térmico, de entre as projectadas, é a estratégia S39, quer para a estação de aquecimento, quer para a estação de arrefecimento. Esta estratégia consiste na colocação do isolamento térmico de 8cm de espessura pelo exterior, na utilização de soluções envidraçadas com um coeficiente de transmissão térmica de  $3.3W/m^2\ ^\circ C$  e um factor solar de 0.6, bem como na garantia de uma taxa de renovação do ar de  $0.4h^{-1}$ .

Através da análise comparativa entre a melhor estratégia e a solução original do caso de estudo, concluiu-se que com a estratégia S39 é obtido um desconforto térmico mais

baixo 18.46% para a zona ZT11 e 7.92% para a zona ZT16. Consequentemente, o edifício requer um menor consumo de energia para aquecimento, sendo este de apenas 46.49kWh/m<sup>2</sup>a, quando a solução original requer 138.16kWh/m<sup>2</sup>a.

Para a estação de arrefecimento obtém-se um desconforto térmico 65.30% inferior ao registado para a solução original, para a zona ZT11, e 31.49% inferior ao registado para a solução original, para a zona ZT16.

Segundo a estimativa realizada para a implementação desta estratégia constatou-se que esta necessita de um investimento inicial que ronda os 22500€, apresentando um retorno de 6 anos e 40 dias. Pois o consumo que é poupado em relação à solução original do caso de estudo é de 91.67kWh/m<sup>2</sup>a, o que corresponde a 19516.31kWh.

Outras possíveis estratégias a implementar, e que não foram estudadas na presente dissertação, passariam por estratégias activas, como o aquecimento contínuo ou intermitente da habitação, por forma a tirar melhor partido da inércia térmica da construção. É de relembrar que o padrão de utilização do edifício tem uma grande influência no conforto térmico interior, não sendo obtido exclusivamente pelas estratégias físicas que se podem implementar.

## **7.4. Simulação dinâmica**

Os programas de simulação dinâmica de edifícios são, nos dias de hoje, essenciais na área de eficiência energética e conforto térmico, pois possuem a capacidade de produzir um elevado número de resultados, cuja análise é essencial na fase de projecto e até mesmo durante a operação dos edifícios. É, portanto, uma ferramenta de apoio essencial à tomada de decisão possibilitando que soluções potencialmente beneficiadoras sejam identificadas (Pereira et al. 2010).

Contudo, os programas podem apresentar algumas limitações. Durante a validação do modelo sentiu-se dificuldade em simular o fenómeno da inércia térmica conferida pelo material, adobe. Segundo um trabalho recente que também recorre à simulação dinâmica de edifícios com paredes de elevada espessura e grande massa, da autoria de Rui Jerónimo (Jerónimo, 2014), constatou-se a existência do mesmo problema. Por forma a conferir esta capacidade ao modelo numérico manipulou-se o modelo pela introdução de um determinado volume de massa interna nas zonas térmicas habitáveis e de aumentar os

valores relativos à massa estrutural, através da densidade e calor específico dos materiais, bem com os valores da condutibilidade térmica dos materiais. Tendo o cuidado de aumentar os valores apenas dentro do intervalo permitido, o que é relativo a cada tipo de material segundo o ITE50 (Pina dos Santos *et al.*, 2006), sem descaracterizar os materiais existentes no caso de estudo.

## **7.5. Norma Europeia EN 15251**

Através da análise do conforto térmico pela norma EN 15251 constatou-se que esta não se encontra bem adaptada à avaliação do conforto térmico na estação de arrefecimento. Pois o intervalo de temperaturas de conforto admitido pela norma considera que as temperaturas que se encontram entre 18°C a 20°C contribuem para a percentagem de tempo de desconforto, para todo o intervalo da temperatura exterior média ponderada (14°C a 22°C). E por considerar, por outro lado, que as temperaturas que se encontram entre os 28°C e os 30°C contribuem para o conforto térmico, para o intervalo da temperatura exterior média ponderada de 17°C a 22°C.

## **7.6. Perspectiva de trabalhos futuros**

A presente dissertação permitiu contribuir no âmbito do conhecimento na área do comportamento térmico e energético, bem como na área de simulação dinâmica do comportamento térmico e energético de edifícios, perspectivando assim os seguintes pontos que se devem ter em conta em trabalhos futuros:

- Com o objectivo de aumentar a fiabilidade do modelo numérico, para além do registo de temperatura e humidade relativa, deve ser também medida a taxa de ventilação dos espaços, deve ser feito um levantamento rigoroso de todos os equipamentos e iluminação existentes no edifício, bem como o padrão de utilização do edifício (abertura de janelas e activação dos dispositivos de sombreamento);
- Apenas foram considerados alguns parâmetros para o estudo das diferentes estratégias de reabilitação, devem ser avaliados outros parâmetros, como o aumento da área envidraçada de modo a promover os ganhos solares, o padrão de utilização

do edifício associado aos dispositivos de sombreamento, a orientação do edifício, entre outros. Assim como a implementação de medidas activas;

- É importante a realização de um estudo acerca da exequibilidade das medidas seleccionadas, e de um estudo sobre a viabilidade económica associada a cada medida;
- Seria interessante proceder à alteração do algoritmo de cálculo de balanço superficial, com o objectivo de realizar um estudo mais aprofundado que tenha em consideração os fenómenos de transferência de vapor de água na avaliação do conforto térmico;
- Apenas se teve em consideração a norma EN 15251 (CEN, 2007) para a avaliação do conforto térmico interior, no entanto, seria interessante avaliar o conforto dos edifícios de adobe com base noutras normas como a ASRAE 55 (2004), a ISO 7730 (2005), e a ISO/TS 14415 (2005), concluindo acerca das suas limitações.





---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS







## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abreu, M.I. & Lopes, J., 2006. *Energetic Rehabilitation in Buildings: Cost-Effective Solutions to Minimise Thermal Bridging*, Instituto Politécnico de Bragança.

Allinson, D. & Hall, M., 2010. Hygrothermal analysis of a stabilised rammed earth test building in the UK. *Energy and Buildings*, 42(6), pp.845–852.

Almeida, Hélder Silva, 2010. Análise do conforto térmico de edifícios utilizando as abordagens analíticas e adaptativas. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, IST - Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.

Almeida, M. et al., 2012. Livro de Atas. In M. Almeida et al., eds. *Seminário Reabilitação Energética de Edifícios*. Guimarães: Universidade do Minho. 9789899654365.

Anselmo, I., Nascimento, C. & Moldanado, E., 2004. *Reabilitação energética da envolvente de edifícios residenciais* DGGE/IP-3E ed., Iniciativa Pública sobre Eficiência Energética de Edifícios. 9728268335.

ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, 2004. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. ASHRAE, Atlanta, USA.

ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, 2010. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. ASHRAE, Atlanta, USA.

Braga, A. & Rocheta, V., 2008. A construção em terra e a sustentabilidade. In: 5º *Seminário de Arquitectura em Terra em Portugal*. Aveiro, 2007. 8 p.

Brager, G. & de Dear, R., 1998. Thermal adaptation in the built environment: a literature review. *Energy and Buildings*, 27 (1), pp. 83-96.

Calleja Rodríguez, G. et al., 2013. Uncertainties and sensitivity analysis in building energy simulation using macroparameters. *Energy and Buildings*, 67, pp.79–87.

Cancela, D.C.P., 2013. Comportamento higrotérmico e monitorização de construções em adobe. Dissertação para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil, UA - Universidade de Aveiro.

Carvalho, C.M., 2008. Simulação do comportamento térmico de edifícios com fachadas ventiladas. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, UA - Universidade de Aveiro.

CEN - Comité Européen de Normalisation, EN 15251:2007 – Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings- addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics. CEN, Brussels, Belgium, 2007;

Clarke, J.A., 2001. *Energy Simulation in Building Design*. 2nd edition. Oxford, England: Butterworth-Heinemann.

Corvacho, M.H.P., 1996. Pontes Térmicas - Análise de fenómenos e propostas de soluções. Dissertação para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, FEUP - Faculdade de Engenharia Universidade do Porto

CTCV – Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro, 2012. *Estudo do comportamento térmico das coberturas com telhas cerâmicas*. Projecto nº212-16859, Novembro de 2012.

Curado, António José Candeias, 2014. Conforto Térmico e Eficiência Energética nos Edifícios de Habitação Social Reabilitados. Dissertação para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, FEUP - Faculdade de Engenharia Universidade do Porto.

DL n.º118/2013. Regulamento de Desempenho e Energético de Edifícios de Habitação. Diário da República, I Série - A, Decreto-Lei nº 118/2013, Agosto, Lisboa, 2013.

EnergyPlus, 2015. *EnergyPlus Energy Simulation Software*. Consultado em 2015: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>

EnergyPlus, 2013a. *EnergyPlus Engineering Reference*. Consultado em: 2014. Disponível em: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/pdfs/engineeringreference.pdf>

*EnergyPlus*, 2013b. *EnergyPlus Input/Output Reference*. Consultado em: 2014. Disponível em:

<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/pdfs/inputoutputreference.pdf>

*EnergyPlus*, 2013c. *Getting Started with EnergyPlus*. Consultado em: 2014. Disponível em: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/pdfs/gettingstarted.pdf>

EPBD - Energy Performance of Buildings Directive, 2010. EU, E. U. Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the Energy Performance of Buildings. Official Journal of the European Union L, 2010, 153: 13.

Ferreira, J., 2012. Palácio Condes de Murça : Uma reabilitação com classe A pelo sistema LiderA. Plano Sustentável - Projectos e edifícios sustentáveis.

Finteiro, A.R. de C., 1998. Diagnóstico das condições de ventilação em edifícios de habitação. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, FEUP - Faculdade de Engenharia Universidade do Porto.

Fontaine, L., Anger, R., 2009: “Bâtir en Terre. Du grain de sable à l'architecture”. Paris: Editions Belin/ Cité des Sciences et de l'industrie, pp153.

Gendebien, S., Bertagnolio, S. & Lemort, V., 2013. Investigation on a ventilation heat recovery exchanger: Modeling and experimental validation in dry and partially wet conditions. *Energy and Buildings*, 62, pp.176–189.

Gonçalves, H. & Graça, J.M., 2004. Conceitos Bioclimáticos para os Edifícios em Portugal. DGGE/IP-3E ed. 9728268343.

IPMA – Instituto Português do Mar e da Atmosfera, 2013. Consultado em: 2013. Disponível em: <http://www.ipma.pt>.

ISO 7730 – International organization for standardization, 2005. Ergonomics of the Thermal Environment, Analytical Determination and Interpretation of Thermal Comfort using Calculation of the PMV and PPD Indices and Local Thermal Comfort Criteria. ISO, Genève, Switzerland.

ISO/TS 14415, 2005. International Organization for Standardization, Ergonomics of the Thermal Environment – Application of International Standards to People with Special Requirements.

ISO, BSEN. 6946: 2007 Building components and building elements – Thermal resistance and thermal transmittance – Calculation method. 1923.

Jalali, S. & Eires, R., 2008. Inovações científicas de construção em terra crua. In: *Conferência Internacional - Angola: Ensino, Investigação e Desenvolvimento*.

Jardim, F.M.G., 2009. Proposta de Intervenção de Reabilitação Energética de Edifícios de Habitação. Dissertação para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil, Escola de Engenharia da Universidade do Minho.

Jerónimo, Rui Miguel Sendas, 2014. Avaliação do desempenho higrotérmico e do conforto de edifícios rurais reabilitados. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Labrincha, J., Samagaio, A. & Vicente, R., 2005. *Sub Projecto de Isolamento Térmico - 2º Relatório de Progresso*, Aveiro. AveiroDomus e Universidade de Aveiro.

Lamberts, R., & Naranjo, A., 2011. *Desempenho térmico de edificações*. Laboratório de Eficiência Energética Em Edificações - Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil. 6ª edição, Florianópolis, 2011.

Lanham, A., Gama, P. & Braz, R., 2004. Arquitectura Bioclimática Perspectivas de inovação e futuro. In *Seminários de Inovação*. Instituto Superior Técnico.

Lima, M.A. da S., 1995. Armazenamento de energia térmica em componentes de edifícios sobre os quais incide radiação solar directa. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Lisboa, C., 2007. Conforto térmico na habitação - Necessidades e soluções. In: *Escola Superior de Tecnologia de Viseu. Dia do DEC, 2007.04.19*. pp. 1–26.



Lopes, N.V., 2006. Reabilitação de Caixilharias de Madeira em Edifícios do Século XIX e Início do Século XX. Dissertação para a obtenção do grau de mestre em Reabilitação do Património Edificado, FEUP - Faculdade de Engenharia Universidade do Porto.

Loutzenhiser, P. G., Maxwell, G. M., & Manz, H., 2007. An empirical validation of the daylighting algorithms and associated interactions in building energy simulation programs using various shading devices and windows. *Energy*, 32, pp. 1855-1870.

Matias, Luís Manuel Cordeiro, 2010. Desenvolvimento de Um Modelo Adaptativo Para Definição das Condições de Conforto Térmico em Portugal. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

Mendonça, P. J., 2005. Habitar sob uma segunda pele: estratégias para a redução do impacto ambiental de construções solares passivas em climas temperados. Dissertação para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil. Universidade do Minho. Guimarães.

Nicol, Fergus & Roaf, Susan, 2007. Progress on Passive Cooling: Adaptive Thermal Comfort and Passive Architecture. In: Earthscan, *Building – Energy – Solar Technology*. Estados Unidos da América, 2007. Mat Santamouris, pp.1-24. 978-1-84407-263-7.

Oropeza-Perez, I., Østergaard, P.A. & Remmen, A., 2012. Model of natural ventilation by using a coupled thermal-airflow simulation program. *Energy and Buildings*, 49, pp.388–393.

Paiva, J.A.V. de, 2000. Medidas de reabilitação energética em edifícios. LNEC, Lisboa, 9724918599.

Parker, D. S., McIlvaine, J. E. R., Barkaszi, S. F., Beal, D. J., & Anello, M. T., 2000. Laboratory Testing of the Reflectance Properties of Roofing Material. FSEC-CR-670-00. Florida Solar Energy Center, FL. Disponível em:  
<http://www.fsec.ucf.edu/en/publications/html/fsec-cr-670-00/>

Pereira, F.B., Teodoro, A.F. de L. & Lopes, M.A.S., 2010. Análise e pesquisa dos processos de instalação utilizando software de simulação. Dissertação para a obtenção do título de Graduação do Curso de Engenharia de Produção da Universidade Anhembimorumbi. São Paulo.

Pina dos Santos, C., Matias, L., 2006. Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios. Informação Técnica Edifícios ITE 50. Lisboa: LNEC.

Pinto, J., Cardoso, R., Paiva, A., Cunha, S., Cruz, D., Vieira, B., Louzada, J., Varum, H., 20011. Caracterização de paredes tradicionais de tabique. In: Lourenço, P., Vasconcelos, G., et al, *Paredes divisórias: Passado, presente e futuro*. Universidade do Minho. Junho 2011.

RCCTE, 2006. Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios. Diário da República, I Série - A, Decreto-lei nº 80/2006, Abril, Lisboa, 2006.

Rodrigues, A.M., Piedade, A.C. da & Braga, A.M., 2009. *Térmica de Edifícios*. 1ª ed. E. Orion, ed. 9789728620134.

Rodrigues, P.F., 2007. Construcoes em terra crua. Tecnologias, potencialidades e patologias. *Revista MUSA*, nº2, pp.149–155.

Rostamizadeh, M., Khanlarkhani, M. & Sadrameli, S.M., 2012. Simulation of energy storage system with phase change material (PCM). *Energy and Buildings*, 49, pp.419–422.

RSECE, 2006. Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização nos Edifícios. Diário da República, I Série - A, Decreto-lei nº 79/2006, Abril, Lisboa, 2006.

Santos, R. M. F. G. dos, 1989. Avaliação da qualidade térmica de projectos de edifícios de habitação. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

SCE, 2006. Sistema de Certificação Energética. Diário da República, I Série - A, Decreto-lei nº 78/2006, Abril, Lisboa, 2006.

Silva, P. et al., 2012. Reabilitação Integrada de Edifícios. In M. Almeida et al., eds. *Livro de Atas - Seminário da Reabilitação Energética de Edifícios*. Guimarães: Universidade do Minho. 9789899654365.

Soares, N., Costa, J. J., Gaspar, a. R., & Santos, P., 2013. Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency. *Energy and Buildings*, 59, 82–103. doi:10.1016/j.enbuild.2012.12.042

Sousa, J., Silva, S. & Almeida, M., 2012. Energy Rehabilitation of Portuguese Residential Building Stock Through its Transformation into NZEB. In M. Almeida et al., eds. *Livro de Atas - Seminário da Reabilitação Energética de Edifícios*. Guimarães: Universidade do Minho. 9789899654365.

Sucrana, 2009. Sucrana® Soluções em Engenharia. Consultado em 2014. Disponível em: <http://www.sucrana.com.br/tabela.php>

Tavares, A., Costa, A., Varum, H., 2011. Manual de Reabilitação e Manutenção de Edifícios - Guia de Intervenção. Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro. INOVADOMUS. Junho de 2011.

Tavares, A., Costa, A., Varum, H., 2012a. Adobe and Modernism in Ílhavo, Portugal. *International Journal of Architectural Heritage: Conservation, Analysis, and Restoration*, 6:5, 525-541.

Tavares, A., Costa, A., Varum, H., 2012b. Common Pathologies in Composite Adobe and Reinforced Concrete Constructions. *Journal of performance of constructed facilities* © ASCE, July/August, 2012.

TDCC - The Dow Chemical Company, 2013. *Dow Building Solutions*. Consultado em: 2013. Disponível em: <http://building.dow.com/europe/pt/insulate/thermal/floors/iso.htm>

Torgal, Fernando Pacheco & Jalali, S., 2009a. Construção em Terra: algumas considerações sobre a selecção de solos. In: *Conferência Engenharia 2009, 10, Covilhã, Portugal*.

Torgal, F., & Jalali, S., 2009b. Patologia e reabilitação de construções em terra. *Arte & Construção*. pp. 38–41.

Torgal, F., & Jalali, S., 2009c. Construção em Terra: o passado, o presente e o futuro. *Arte & Construção*, October, pp. 52–56.

Torgal, F., Jalali, S., & Eires, R., 2009d. A construção em terra. Universidade do Minho. Guimarães: TecMinho. doi:978-972-8692-40-7.

TPS – Technical Preservation Services, 2015. Preservation of Historic Adobe Buildings, 1978. Disponível em: <http://www.nps.gov/tps/how-to-preserve/briefs/5-adobe-buildings.htm> (Consultado em 2015).

Varum, H. et al., 2007. Caracterização e reabilitação de construções existentes em terra. In *I Jornadas de eco-construção: “Casas saudáveis para o presente.”* pp. 2–8.



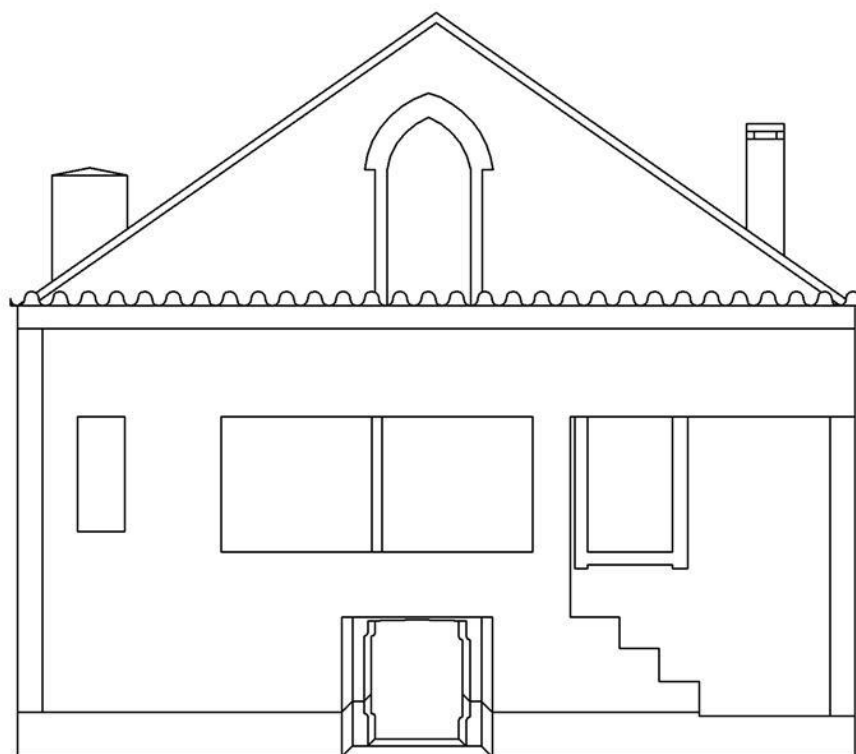








## ANEXO A – PLANTAS DO CASO DE ESTUDO



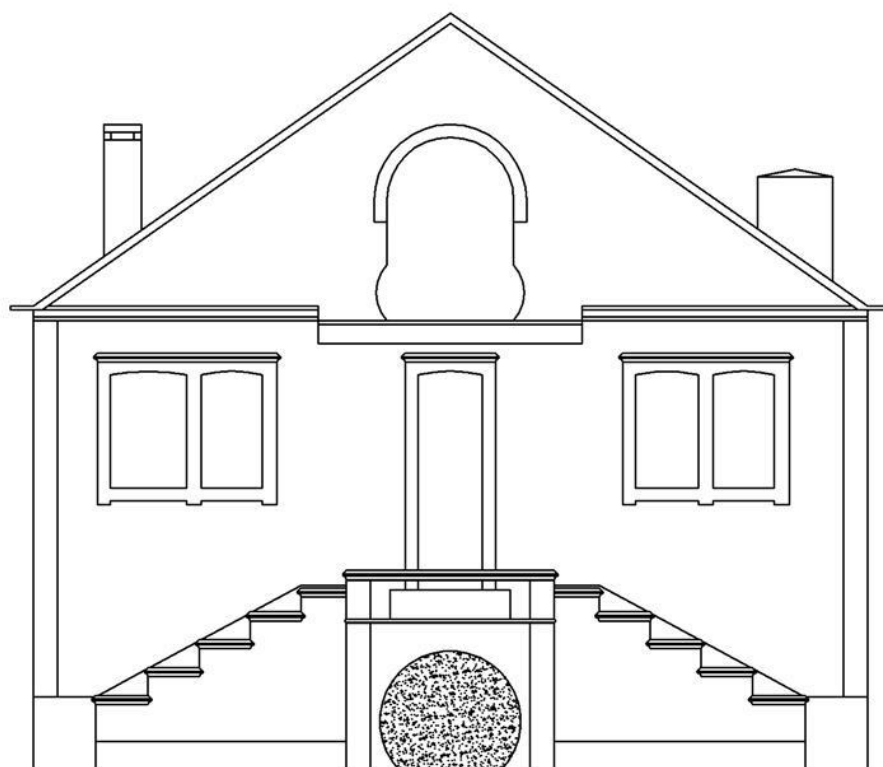
...

Alçado noroeste  
Casa A

Escala 1:100

Desenho A1

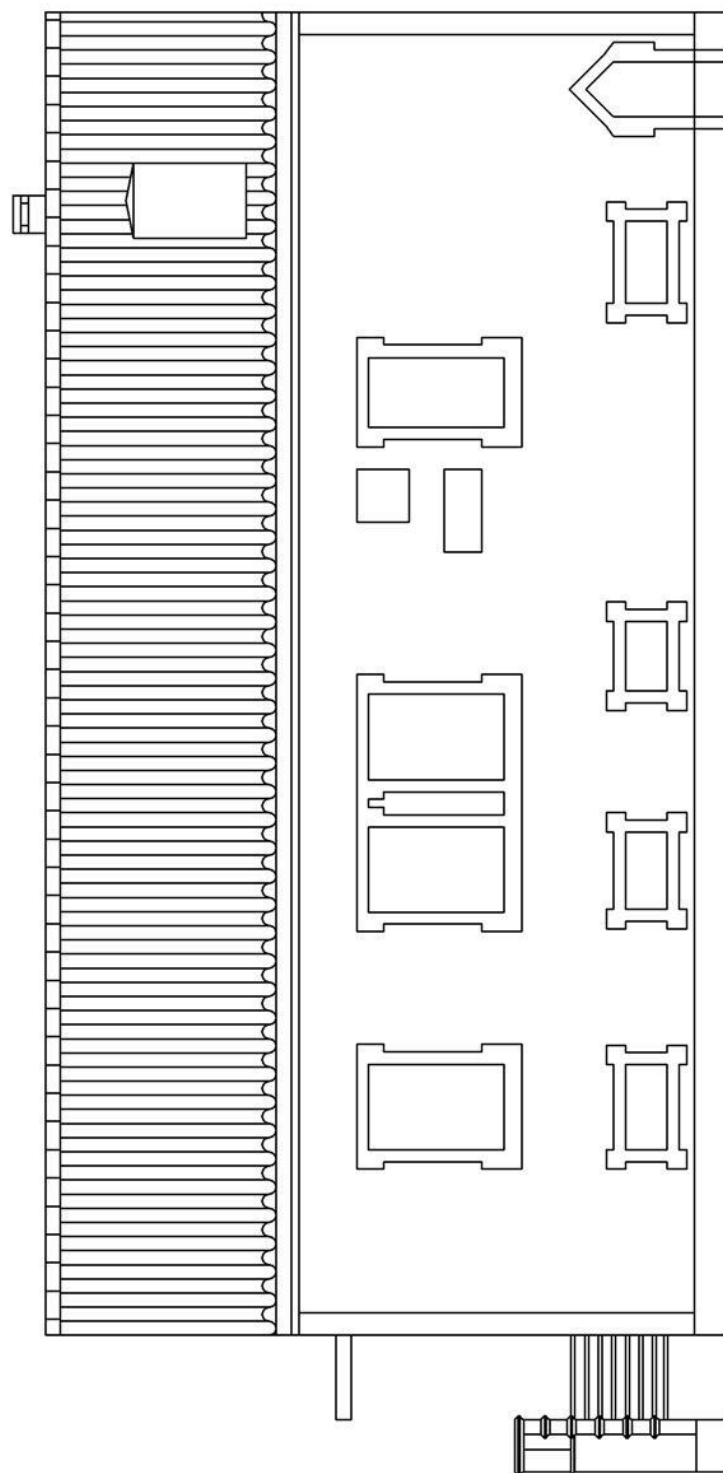




Alçado sudeste  
Casa A

Escala 1:100

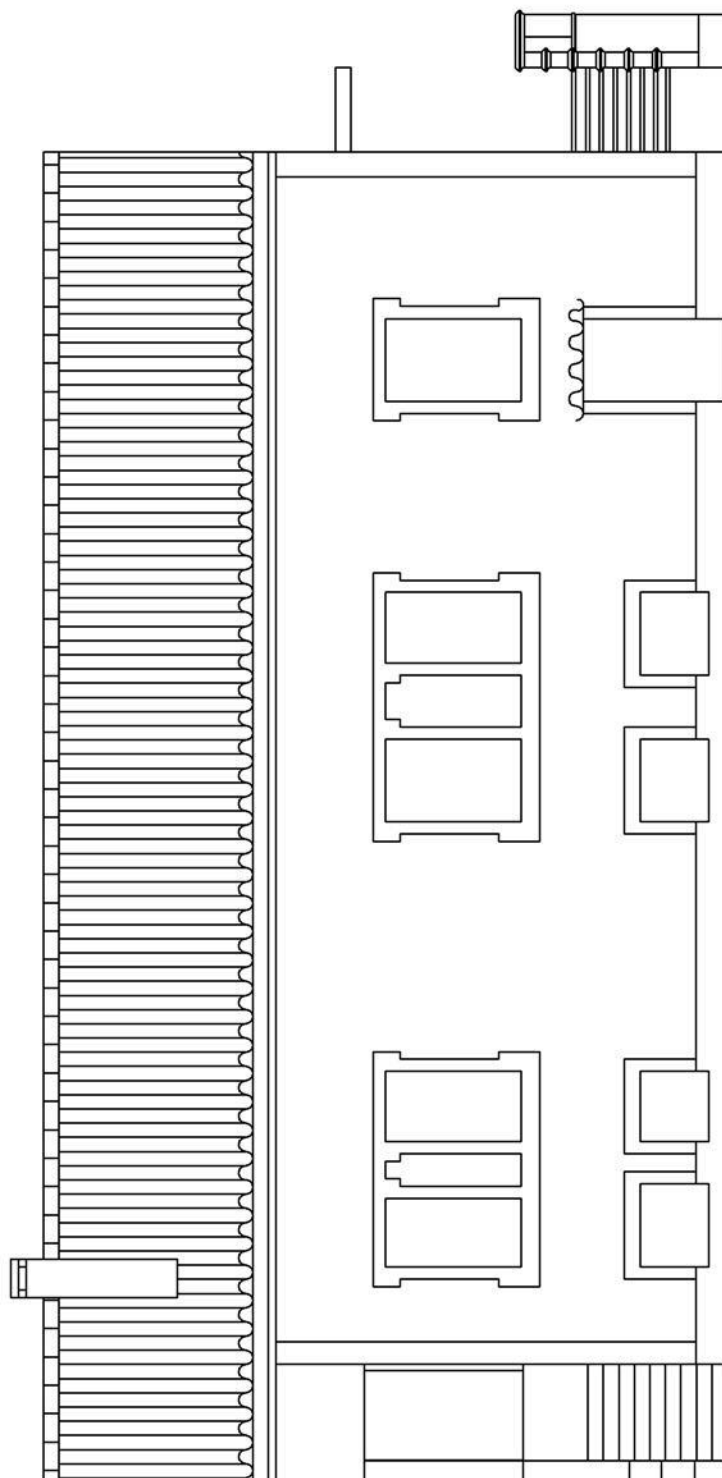
Desenho A2



Alçado nordeste  
Casa A

Escala 1:100

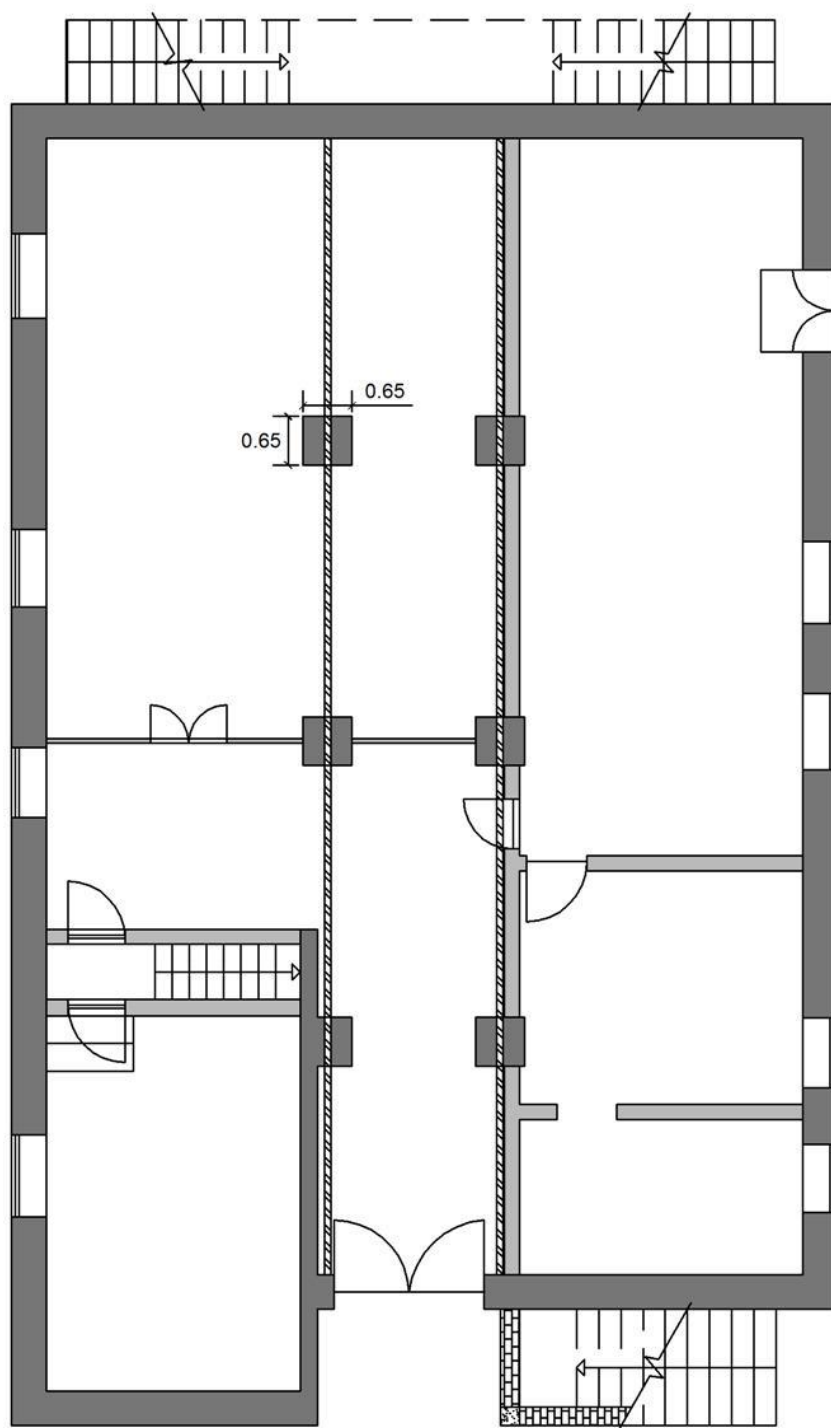
Desenho A3



Alçado sudoeste  
Casa A

Escala 1:100

Desenho A4



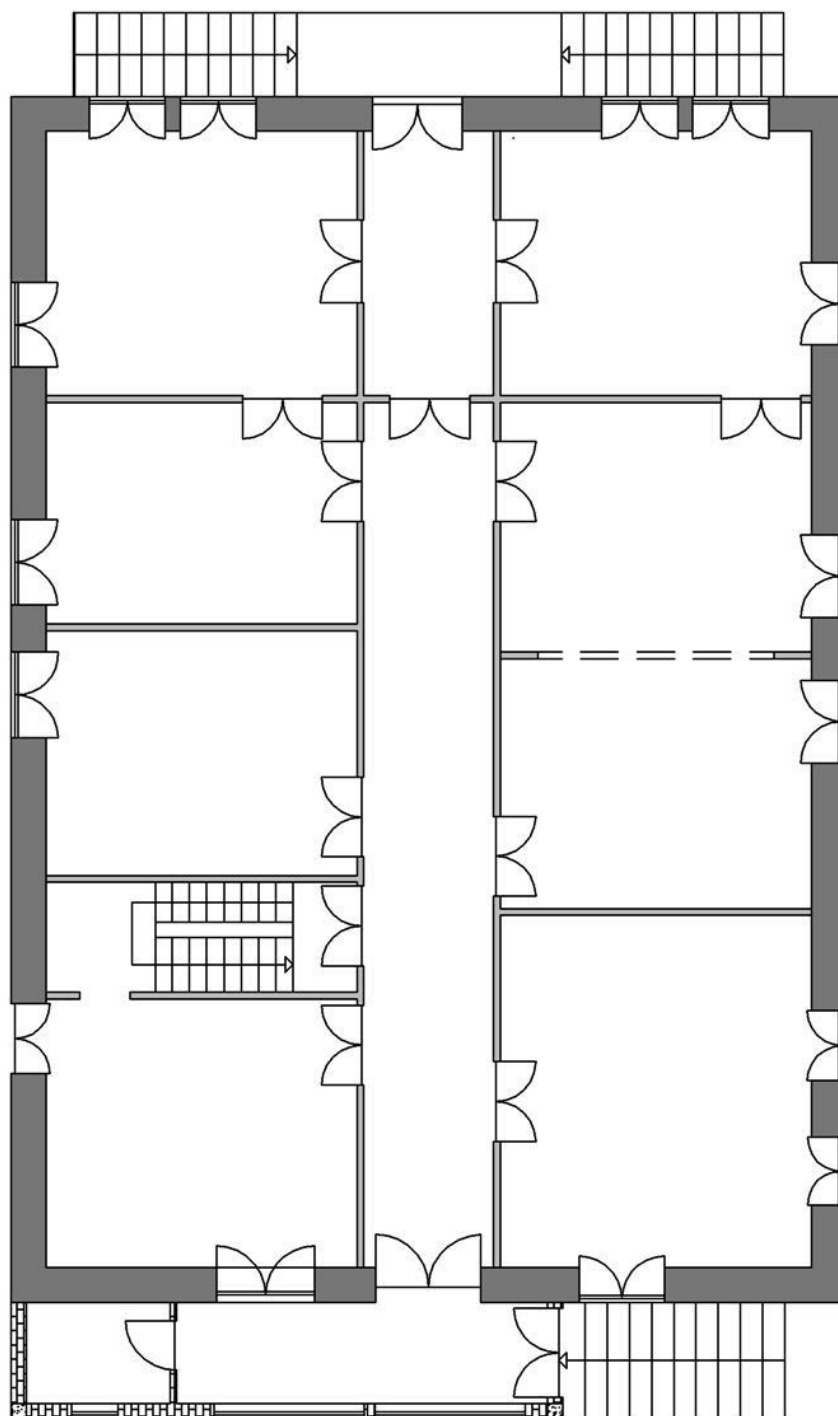
Planta da cave  
Casa A

Escala 1:100

Desenho A5

-  Paredes de Tabique
-  Paredes de Adobe
-  Aço
-  Betão Armado





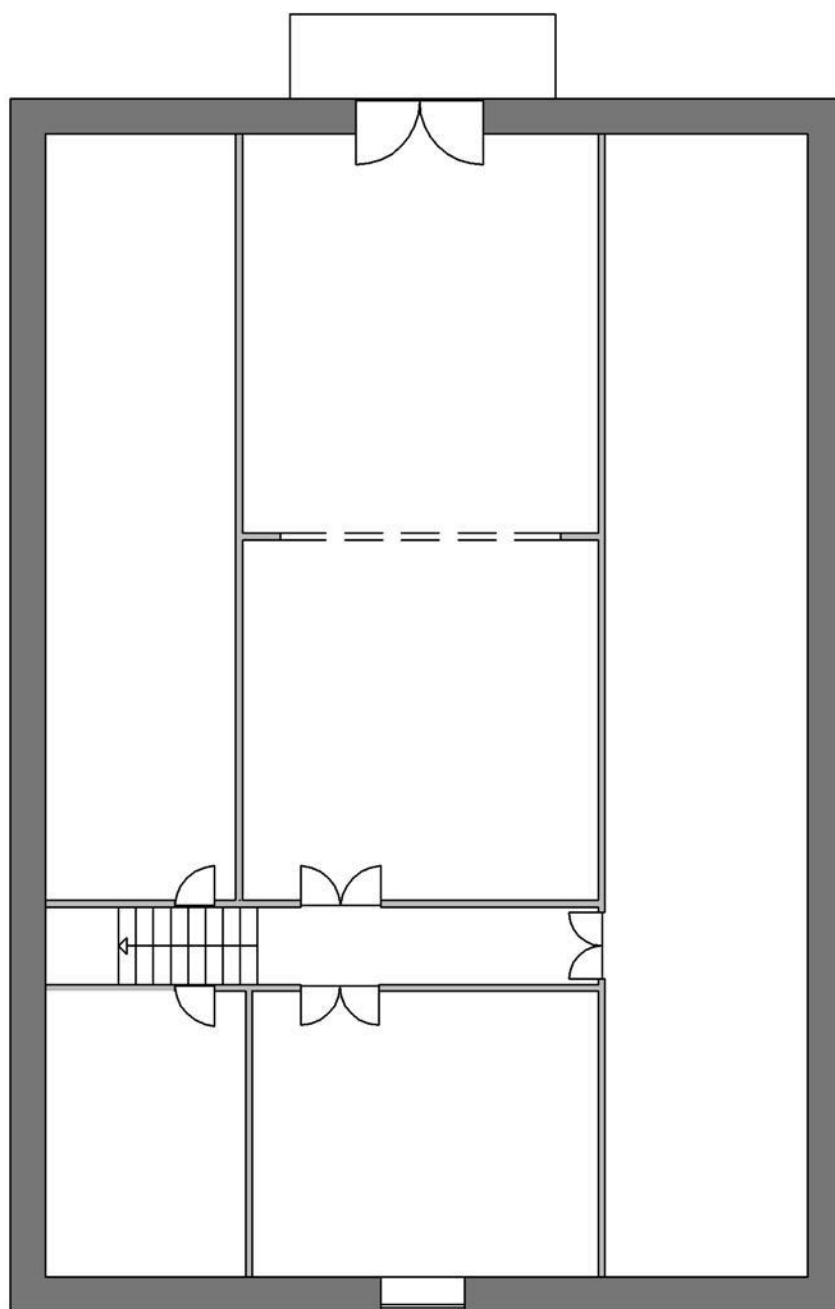
Planta do 1º andar  
Casa A

Escala 1:100

Desenho A6

-  Paredes de Tabique
-  Paredes de Adobe
-  Betão Armado
-  Alvenaria de tijolo





Planta do sótão  
Casa A

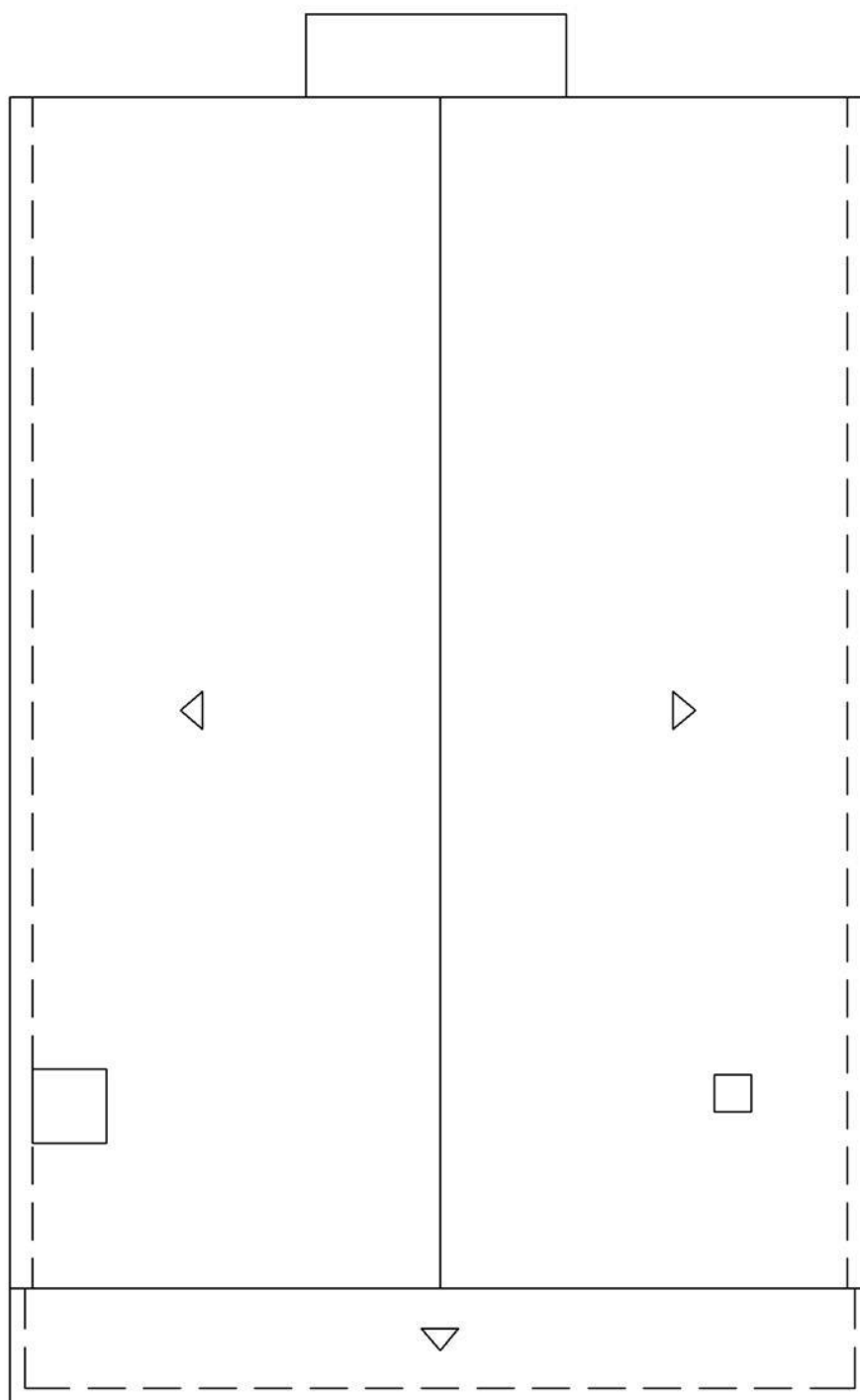
Escala 1:100

Desenho A7

Paredes de Tabique  
Paredes de Adobe








Planta da cobertura  
Casa A

Escala 1:100

Desenho A8

 Paredes de Tabique  
Paredes de Adobe



## ANEXO B – RESULTADOS DAS ESTRATÉGIAS DE REABILITAÇÃO

No presente anexo encontram-se os resultados da percentagem de tempo de desconforto térmico para todas as zonas térmicas habitáveis, relativas às 24 estratégias simuladas, para ambas as estações.

De seguida, são apresentados os resultados relativos à percentagem de tempo de desconforto térmico, para a estação de aquecimento.

Tabela 31 - Percentagem de desconforto das estratégias S2, S5, S8, S9, S11, S14, S17 e S18, para a estação de aquecimento.

Piso	Orientação	Zona Térmica	Isolamento térmico de 3cm							
			Exterior				Interior			
			S2	S5	S8	S9	S11	S14	S17	S18
r/c	NE	ZT1	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1ªA	NE	ZT5	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1ªA	NE	ZT6	99.08	99.61	99.72	98.95	99.89	100.00	100.00	99.89
1ªA	NE	ZT7	97.69	98.54	98.97	97.25	98.47	99.41	99.87	98.95
1ªA	NE/SE	ZT8	90.18	93.41	94.87	91.34	91.84	94.83	96.07	94.13
1ªA	SW/NW	ZT10	91.71	94.39	95.62	91.86	93.30	95.51	96.73	94.70
1ªA	SW	ZT11	88.02	91.23	93.08	88.44	89.86	93.28	95.14	91.19
1ªA	SE/SW	ZT12	82.42	86.71	88.77	85.25	83.57	88.46	90.99	87.22
1ªA	-	ZT9	89.27	91.78	93.37	89.22	90.88	93.41	94.96	91.54
Sótão	NW	ZT15	97.34	97.84	98.10	97.51	97.49	98.04	98.36	97.73
Sótão	SE	ZT16	94.22	95.05	95.46	94.20	94.46	95.38	95.83	94.59

Tabela 32 - Percentagem de desconforto das estratégias S20, S23, S26, S27, S29, S32, S35 e S36, para a estação de aquecimento.

Piso	Orientação	Zona Térmica	Isolamento térmico de 5cm							
			Exterior				Interior			
			S20	S23	S26	S27	S29	S32	S35	S36
r/c	NE	ZT1	99.85	99.89	99.93	99.78	99.91	99.96	99.98	100.00
1ªA	NE	ZT5	99.43	99.63	99.69	99.26	100.00	100.00	100.00	100.00
1ªA	NE	ZT6	97.82	98.43	98.78	96.44	98.80	99.72	99.89	98.78
1ªA	NE	ZT7	94.11	96.75	97.36	92.36	96.99	98.19	98.80	96.55
1ªA	NE/SE	ZT8	86.67	89.64	90.95	87.22	88.72	92.21	94.15	90.42
1ªA	SW/NW	ZT10	88.00	90.77	92.28	87.54	90.77	93.52	95.16	91.30
1ªA	SW	ZT11	84.42	87.78	89.49	83.55	86.54	90.36	92.67	87.17
1ªA	SE/SW	ZT12	79.25	83.01	85.54	81.46	80.06	84.99	88.15	83.62
1ªA	-	ZT9	86.58	89.14	90.36	86.32	88.22	91.27	92.80	88.44
Sótão	NW	ZT15	96.49	97.08	97.34	96.42	96.86	97.51	97.82	97.12
Sótão	SE	ZT16	93.35	94.28	94.72	93.11	93.87	94.68	95.31	93.76

Tabela 33 - Percentagem de desconforto das estratégias S38, S41, S44, S45, S47, S50, S53 e S54, para a estação de aquecimento.

Piso	Orientação	Zona Térmica	Isolamento térmico de 8cm							
			Exterior				Interior			
			S38	S41	S44	S45	S47	S50	S53	S54
r/c	NE	ZT1	99.17	99.41	99.43	98.65	99.56	99.69	99.74	99.54
1ªA	NE	ZT5	98.43	98.80	98.91	97.77	99.83	100.00	100.00	99.85
1ªA	NE	ZT6	95.51	97.05	97.49	92.06	97.73	98.58	99.08	96.79
1ªA	NE	ZT7	90.31	92.41	93.85	88.02	93.94	96.68	97.51	92.47
1ªA	NE/SE	ZT8	83.40	86.63	87.96	83.36	85.86	89.40	91.49	86.71
1ªA	SW/NW	ZT10	84.47	87.54	88.92	83.51	87.61	91.08	92.76	87.54
1ªA	SW	ZT11	81.17	84.45	86.52	80.61	83.66	87.37	89.81	83.36
1ªA	SE/SW	ZT12	76.57	80.24	82.26	79.69	77.03	82.31	85.17	80.54
1ªA	-	ZT9	84.01	86.85	87.96	83.20	85.71	88.90	90.58	85.80
Sótão	NW	ZT15	95.62	96.27	96.64	95.35	96.31	96.99	97.29	96.25
Sótão	SE	ZT16	92.32	93.52	94.00	91.67	93.00	94.26	94.76	92.80

Nas tabelas apresentadas em seguida encontram-se os resultados relativos à percentagem de tempo de desconforto térmico, para a estação de arrefecimento.

Tabela 34 - Percentagem de desconforto das estratégias S2, S5, S8, S9, S11, S14, S17 e S18, para a estação de arrefecimento.

Piso	Orientação	Zona Térmica	Isolamento térmico de 3cm							
			Exterior				Interior			
			S2	S5	S8	S9	S11	S14	S17	S18
r/c	NE	ZT1	98.50	98.67	98.84	98.67	98.39	98.91	99.01	99.18
1ªA	NE	ZT5	41.94	49.76	54.61	40.30	43.20	49.56	53.93	41.36
1ªA	NE	ZT6	50.41	55.84	58.74	37.77	50.51	55.09	57.62	39.79
1ªA	NE	ZT7	56.35	61.51	63.73	42.11	54.92	59.19	61.71	43.61
1ªA	NE/SE	ZT8	56.18	61.17	63.83	46.07	54.64	58.81	61.17	45.63
1ªA	SW/NW	ZT10	48.36	56.39	61.85	43.92	47.27	54.85	60.04	43.75
1ªA	SW	ZT11	51.26	56.32	59.94	39.62	51.33	55.36	57.79	40.30
1ªA	SE/SW	ZT12	50.75	57.34	61.10	42.83	50.51	55.02	58.27	42.49
1ªA	-	ZT9	26.09	31.56	34.94	19.06	27.02	32.24	35.89	20.66
Sótão	NW	ZT15	20.29	23.53	25.07	17.11	22.61	25.31	27.05	19.60
Sótão	SE	ZT16	14.69	16.46	17.55	10.31	16.33	17.96	19.13	12.06

Tabela 35 - Percentagem de desconforto das estratégias S20, S23, S26, S27, S29, S32, S35 e S36, para a estação de arrefecimento.

Piso	Orientação	Zona Térmica	Isolamento térmico de 5cm							
			Exterior				Interior			
			S20	S23	S26	S27	S29	S32	S35	S36
r/c	NE	ZT1	97.88	98.26	98.39	98.05	98.22	98.63	98.80	98.98
1ªA	NE	ZT5	30.77	37.81	42.79	26.81	33.91	40.57	44.19	31.35
1ªA	NE	ZT6	35.35	40.37	43.41	22.06	37.81	41.67	43.89	26.26
1ªA	NE	ZT7	38.39	43.82	45.87	22.17	40.71	44.84	46.52	26.54
1ªA	NE/SE	ZT8	39.28	43.92	46.14	24.35	41.67	46.11	47.47	28.48
1ªA	SW/NW	ZT10	32.75	40.64	46.31	24.08	34.63	42.28	46.07	26.43
1ªA	SW	ZT11	38.22	43.17	45.80	22.03	39.45	44.09	46.93	25.85
1ªA	SE/SW	ZT12	35.62	40.88	43.48	22.44	37.53	42.38	44.81	25.51
1ªA	-	ZT9	17.14	22.13	24.83	9.84	19.16	23.70	26.13	13.22
Sótão	NW	ZT15	16.91	19.64	20.49	13.15	19.54	22.06	23.02	16.05
Sótão	SE	ZT16	12.33	13.56	14.41	8.06	14.11	15.54	16.60	9.53

## Simulação do comportamento térmico e energético de edifícios de adobe

Tabela 36 - Percentagem de desconforto das estratégias S38, S41, S44, S45, S47, S50, S53 e S54, para a estação de arrefecimento.

Piso	Orientação	Zona Térmica	Isolamento térmico de 8cm							
			Exterior				Interior			
			S38	S41	S44	S45	S47	S50	S53	S54
r/c	NE	ZT1	97.23	97.68	98.05	97.47	97.78	98.36	98.57	98.63
1ºA	NE	ZT5	21.89	27.22	31.35	16.53	27.08	31.97	35.14	22.92
1ºA	NE	ZT6	23.43	26.84	28.52	9.15	27.90	31.22	32.99	15.37
1ºA	NE	ZT7	24.80	28.01	28.83	7.89	28.45	31.97	33.09	14.04
1ºA	NE/SE	ZT8	25.17	28.28	29.00	8.95	28.69	32.24	33.37	15.44
1ºA	SW/NW	ZT10	20.18	27.02	29.99	8.09	22.92	29.17	31.93	14.52
1ºA	SW	ZT11	25.65	30.05	31.97	10.31	29.34	33.09	34.29	15.37
1ºA	SE/SW	ZT12	22.78	26.47	27.80	6.97	25.24	29.17	30.57	14.04
1ºA	-	ZT9	10.96	14.69	16.19	2.70	13.39	16.73	18.75	6.35
Sótão	NW	ZT15	13.87	15.71	17.01	10.01	16.70	18.95	19.95	13.11
Sótão	SE	ZT16	10.28	11.51	12.16	5.94	12.36	13.59	14.21	7.92

